

Farbspaltungsphänomene von Druckfarben an strukturierten Oberflächen am Beispiel des Flexodrucks

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Stefan Griesheimer, M. Eng.

aus Lampertheim

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
Mitberichterstatter:	PD Dr. habil. Ilia Roisman
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Thilo Bein

Tag der Einreichung:	25.02.2013
----------------------	------------

Tag der mündlichen Prüfung:	04.06.2013
-----------------------------	------------

Darmstadt 2014

D17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-38920

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/3892>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,
E-Publishing-Service der TU Darmstadt.

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de

Abstract

In the last years, the classic graphic printing industry has advanced the production of printed functionality such as strain measurement elements. Flexo printing can be used to transfer different functional fluids by means of a microscopically structured printing plate. In the manufacture of strain measurement elements, knowledge about ink splitting of graphically structured lines of the printing plate is required to optimize flexo printing for printed functionality.

The present work is motivated to investigate the printing process or ink splitting in flexo printing by using a microscopically structured line of the printing plate. The challenge is to analyze the phenomena of ink splitting and to identify their parameters.

Using the method of the parallel plate separation, the ink splitting and the filament formation between a printing form and a glass surface is simulated. An extensional rheometer and a high-speed camera are used to analyze the filament formation in a parametric study. For this purpose, the separation rate, the surface structure as well as the type and amount of the available liquid can be varied. In this connection, fundamental phenomena of ink splitting are derived and discussed scientifically. It is shown in an application-oriented way how filaments are formed when there are non-Newtonian fluids (inks). The formation of these filaments can have a significant influence on the ink transfer and the printing result.

Specifically, the influence the surface structure of the printing plate has on the filament formation is examined. Changing the tonal value, screen width and screen angle of the printing plate, the filament formation varies fundamentally. Depending on the separation rate of the plates, the number of filaments differs. It can be recognized that, in the initial state of the plate separation, the printing ink can be specified so that the time of the break point of filament can be determined in advance. It is noted that the separation rate of the plates has an influence on the shear viscosity in the printing ink and thus it affects the filament formation and the filament break.

This work closes a connecting link between the scientific theory and the practical application in flexo printing. At the same time, discovering filament formation, basic knowledge is imparted to advance flexo printing in the manufacture of printed functionality.

Kurzfassung

Der klassische Druck der grafischen Industrie hat sich in den letzten Jahren zur Herstellung von gedruckter Funktionalität, wie z. B. gedruckten Dehnungsmesselementen (DMS) weiterentwickelt. Dazu kann der Flexodruck genutzt werden, um unterschiedlichste funktionale Flüssigkeiten mit einer mikroskopisch strukturierten Druckform zu applizieren. Bei der Herstellung von Dehnungsmesselementen ist gerade das Wissen der Farbspaltung von grafisch strukturierten Linien der Druckform zwingend erforderlich, um den Flexodruck für die Herstellung gedruckter Funktionalität zu optimieren.

Die vorliegende Arbeit ist dadurch motiviert, den Druckprozess bzw. die Farbspaltung im Flexodruck unter Anwendung einer mikroskopisch strukturierten Linie der Druckform zu untersuchen. Die Herausforderung besteht darin, Phänomene der Farbspaltung zu analysieren und deren Einflussgrößen zu identifizieren.

Mit der Methode der parallelen Plattenseparation wird die Farbspaltung und die Filamententstehung zwischen einer Druckform und einer Glasoberfläche simuliert. Unter Anwendung eines Dehnrheometers und einer Highspeed-Kamera wird die Filamententstehung im Rahmen einer Parameterstudie analysiert. Hierbei werden die Separationsgeschwindigkeit, die Oberflächenstrukturierung und die Art und Menge der vorliegenden Flüssigkeit variiert. Dabei werden grundsätzliche Phänomene der Farbspaltung abgeleitet und wissenschaftlich diskutiert. Anwendungsorientiert wird gezeigt, wie sich bei nicht-Newton'sche Flüssigkeiten (Druckfarben) Filamente ausbilden. Die Entstehung dieser Filamente kann einen wesentlichen Einfluss auf die Farbübertragung und das Druckergebnis haben.

Es wird gezielt der Einfluss der Oberflächenstrukturierung der Druckform auf die Filamententstehung untersucht. Mit Änderung des Tonwerts, der Rasterweite und des Rasterwinkels der Druckform wird festgestellt, wie sich die Filamentbildung fundamental ändert. Hierbei zeigt sich in Abhängigkeit der vorliegenden Separationsgeschwindigkeit der Platten eine unterschiedliche Anzahl von Filamenten. Dabei wird erkannt, dass bei der Plattenseparation im Anfangszustand die Druckfarbe vorgeprägt wird, so dass der Zeitpunkt des Filamentabrisses vorherbestimmt ist. Es wird festgestellt, dass die Separationsgeschwindigkeit der Platten einen Einfluss auf die in der Druckfarbe vorliegende Scherviskosität ausübt. Dadurch werden die Filamententstehung und der Filamentabriss beeinflusst.

Mit dieser Arbeit wird zwischen der wissenschaftlichen Theorie und der praktischen Anwendung im Flexodruck ein Bindeglied geschlossen. Gleichzeitig wird mit den Erkenntnissen der Filamententstehung Grundlagenwissen geschaffen, um den Flexodruck für die Herstellung von gedruckter Funktionalität weiterzuentwickeln.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren des Fachbereichs Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Institutschef Herrn Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam für all die Anregungen und Diskussionen sowie für das in mich gesetzte Vertrauen, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn PD Dr. habil. Ilia Roisman vom Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik (SLA) aus dem Fachbereich Maschinenbau für seine Funktion als Koreferent ausdrücklich bedanken. Seine Vorschläge und Anregungen zu Fragestellungen in dieser Arbeit waren sehr hilfreich.

Weiterhin gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Thilo Bein vom LOEWE-Zentrum AdRIA für seine Bereitschaft, das zweite Koreferat dieser Arbeit zu übernehmen.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren für ihre Unterstützung, die hilfreichen Diskussionen und eine sehr angenehme Arbeitsatmosphäre, die ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. An dieser Stelle gilt meine besonderer Dank Herrn Bornemann, Herrn Jakobi und Herrn Rettig.

Dank gebührt auch Meliksah Ücuncü, der mich im Rahmen seiner Bachelorthesis sowie in seiner Tätigkeit als studentische Hilfskraft unterstützt hat. Sein Engagement hat erheblich zum Erlangen der Versuchsergebnisse beigetragen.

Sehr herzlich möchte ich mich auch bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die während der gesamten Zeit an den Erfolg dieser Arbeit geglaubt und mich in jeglicher Weise unterstützt haben.

Auch bedanken möchte ich mich bei Herrn Sonnenschein und Herrn Prof. Dr.-Ing. Behler für den Hinweis aus dem Jahre 2008 zu einer möglichen Promotion am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der Technischen Universität Darmstadt.

Darmstadt, Februar 2013

Stefan Griesheimer

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
2. Grundlagen der Farbspaltung	3
2.1 Einordnung der Druckverfahren	3
2.2 Flexodruck	4
2.2.1 Druckeinheit	4
2.2.2 Druckprozess	5
2.2.3 Rasterwalze	6
2.2.4 Druckform	7
2.2.5 Druckfarbe	9
2.2.6 Farbübertragung	10
2.2.7 Farbspaltung	11
2.2.8 Funktionales Drucken	16
2.3 Grundlagen der Adhäsion und Benetzung	18
2.3.1 Intermolekulare Kräfte in Flüssigkeiten	18
2.3.2 Oberflächen- bzw. Grenzflächenspannung	19
2.3.3 Kapillardruck nach YOUNG-LAPLACE	21
2.3.4 Kontaktwinkel und Benetzung	22
2.3.5 Kapillarität und Kapillarkraft	29
2.4 Grundlagen der Rheologie	30
2.4.1 Viskosität und Scherrate	30
2.4.2 Fließverhalten von Flüssigkeiten	32
2.4.3 Viskoelastizität und Fließgrenze	34
2.4.4 Grundmodelle der Dehnrheometrie	36
2.5 Grundlagen der instabilen Strömung	40
2.5.1 Kapillarzahl	40
2.5.2 Finger-Instabilität mit Analogie zu SAFFMAN-TAYLOR	40
2.5.3 Weitere dimensionslose Größen	42
2.6 Stand der Forschung – Flüssigkeitsspaltung	43
2.6.1 Partialmodelle der parallelen Plattenseparation	43
2.6.2 Veröffentlichungen mit Newton'schen Flüssigkeiten	46
2.6.3 Veröffentlichungen mit nicht-Newton'schen Flüssigkeiten	46
2.6.4 Flüssigkeitsspaltung zwischen Walzen	48
2.7 Zusammenfassung der Grundlagen	49
3. Zielsetzung und Vorgehensweise	50
4. Charakterisierung	51
4.1 Oberflächencharakterisierung	51

4.1.1	Konfokalmikroskopie	51
4.1.2	Ergebnisse der Flächenanalyse	53
4.2	Fluidcharakterisierung	58
4.2.1	Rotationsrheometer	58
4.2.2	Fließverhalten von Flüssigkeiten	59
4.3	Charakterisierung der Benetzungseigenschaften	64
4.3.1	Kontaktwinkelmessgerät	64
4.3.2	Benetzungseigenschaften von Flüssigkeiten auf Oberflächen	65
5.	Experimentelle Untersuchung zur Farbspaltung	76
5.1	Versuchsaufbau	76
5.1.1	Dehnrheometer HAAKE CaBER	79
5.1.2	Hochgeschwindigkeitskamera Fastcam SA 4	80
5.1.3	Lichtquelle StrobeLED	81
5.1.4	Dichroitischer Filter	82
5.1.5	Planspiegel	82
5.1.6	USB-Kamera	83
5.2	Vorversuche	83
5.2.1	Kraftmessung	83
5.2.2	Fokussierung	86
5.3	Hauptversuche	89
5.3.1	Linienkontakt	89
5.3.2	Separationsgeschwindigkeit	91
5.3.3	Erste Versuchsserie – Erfassung von Phänomenen	92
5.3.4	Zweite Versuchsserie – Tonwert und Separationsgeschwindigkeit	94
5.3.5	Dritte Versuchsserie – Rasterwinkel und Flüssigkeit	96
6.	Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse	98
6.1	Phänomene der Farbspaltung	98
6.1.1	Filament- und Vorhangbildung	99
6.1.2	Lamellenbildung	101
6.1.3	Hautaufriss	103
6.1.4	Filamentabriss	104
6.1.5	Komplexe Abfolge von Phänomenen	106
6.2	Einfluss von Tonwert und Separationsgeschwindigkeit	108
6.2.1	Bestimmung des Hautaufrisses	108
6.2.2	Bestimmung des Filamentabrisses	117
6.3	Einfluss der Ausrichtung des Rasters	125
6.4	Einfluss der Rasterweite	126
6.5	Einfluss der Druckfarbe auf die Filamentbildung	129

6.6 Erkenntnisse der Experimente	130
7. Zusammenfassung und Ausblick.....	133
8. Literaturverzeichnis	135
Anhang.....	151

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	$[m^2]$	Ober-/Grenzfläche
\hat{A}	$[m^2]$	Scherfläche
\tilde{A}	$[m^2]$	belasteter Flächeninhalt
A_p	$[m^2]$	projizierte Oberfläche
A_t	$[m^2]$	tatsächliche Oberfläche
a	$[m]$	Kegelabstand des Rotationsrheometers
Ca	$[-]$	Kapillarzahl (dimensionslos)
Ca_{krit}	$[-]$	kritische Kapillarzahl
c	$[m^{-3}]$	Stoffmenge/Teilchenzahldichte
$D(t)$	$[m]$	zeitabhängiger Filamentdurchmesser
D_E	$[-]$	Deborah-Zahl
$D_{min}(t)$	$[m]$	minimaler Filamentdurchmesser
D_{Platte}	$[m]$	Plattendurchmesser des HAAKE CaBER
D_0	$[m]$	Ausgangsdurchmesser (max. Durchmesser)
dA	$[m^2]$	infinitesimal kleine Flächenvergrößerung
$d\tilde{A}$	$[m^2]$	gekrümmtes Oberflächenelement
dF_n	$[N]$	infinitesimal kleine Normalkraft
dG	$[J]$	infinitesimal kleine, frei werdende Enthalpie
dL	$[m]$	infinitesimal kleine Längenänderung
dR_{min}	$[m]$	infinitesimal minimaler Durchmesser
$dS_1; dS_2$	$[m]$	infinitesimal kleine Strecke
dt	$[m]$	infinitesimal kleine Zeitänderung
dV	$[m^3]$	infinitesimal kleine Volumenänderung
dv	$[m \cdot s^{-1}]$	infinitesimal kleine Geschwindigkeitszunahme
dW	$[J]$	infinitesimal kleine Arbeit
dx	$[m]$	Weglänge
dy	$[m]$	infinitesimal kleine Positionsänderung in y -Richtung

d_{ch}	[m]	charakteristische Länge des Gegenstands
E	[Pa]	Elastizitätsmodul (E-Modul)
F	[N]	angreifende Kraft
FM	[l]	Fluidmenge
F_{bew}	[N]	Bewegungskraft
F_k	[N]	Kapillarkraft
F_n	[N]	Normalkraft
F_{res}	[N]	resultierende Zugkraft
F_s	[N]	Scherkraft
F_z	[N]	Zugkraft in z-Richtung (Separationskraft)
$F_z(t)$	[N]	zeitabhängige Zugkraft in z-Richtung
$f(\dots)$	[...]	Funktion von ...
f_1	[–]	Flächenanteil des benetzten Festkörpers
f_2	[–]	Flächenanteil des Luftpolsters
f_r	[J · m ⁻²]	Spannung aufgrund dyn. Reibungskräfte
G	[Pa]	Scherm modul
\hat{G}	[J]	freie Enthalpie nach GIBBS
g	[9,81 m · s ⁻²]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Plattenabstand
h_A	[m]	Plattenabstand in Ausgangssituation
h_r	[m]	relativer Plattenabstand
Δh_r	[m]	Delta des relativen Plattenabstands
\dot{h}	[m · s ⁻¹]	Separationsgeschwindigkeit der Platten
l	[m]	Filmbreite
L	[m]	Gesamtlänge
$L(t)$	[m]	zeitabhängige Länge
L_0	[m]	ursprüngliche Länge
L_{max}	[m]	maximale Länge
M	[Nm]	Drehmoment des Rotationsrheometers
N	[–]	Teilchenzahl
n	[mol]	Stoffmenge
\hat{n}	[s ⁻¹]	Drehzahl des Rotationsrheometers
Oh	[–]	OHNESORGE-Zahl
PA	[m]	Plattenabstand

p	$[Pa]$	Druck
p_a	$[Pa]$	Außendruck
p_{hs}	$[Pa]$	hydrostatischer Druck
p_i	$[Pa]$	Innendruck
p_k	$[Pa]$	Kapillardruck
p_{kin}	$[Pa]$	Kinetischer Druck
$R; R_a; R_b; R_1; R_2$	$[m]$	Krümmungsradien
$R(z; t)$	$[m]$	Radius des Filaments in Abhängigkeit v. z u. t
$R_{min}(t)$	$[m]$	minimaler Radius
\hat{R}	$[m]$	Radius der Grenzfläche
\tilde{R}	$[J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$	Gaskonstante
Re	$[-]$	REYNOLDS-Zahl
Re_{krit}	$[-]$	kritische REYNOLDS-Zahl
\bar{R}_{rot}	$[m]$	Radius der Kegelplatte (Rotationsrheometer)
r_W	$[-]$	Rauheitsfaktor nach WENZEL
$S_1; S_2$	$[m]$	Strecke
SB	$[m]$	Stegbreite
SL	$[m]$	Steglänge
SV	$[-]$	Stegverhältnis
T	$[K]$	Temperatur
t	$[s]$	Zeit
t_c	$[s]$	Relaxationszeit
t_p	$[s]$	Beobachtungszeit
t_S	$[s]$	Separationszeit
u	$[m \cdot s^{-1}]$	charakteristische Benetzungsgeschwindigkeit
u_x	$[m]$	Verschiebevektor in x -Richtung
V	$[m^3]$	Volumen
v	$[m \cdot s^{-1}]$	Fließgeschwindigkeit
\hat{v}	$[m \cdot s^{-1}]$	Dehn- oder Separationsgeschwindigkeit
v_{ch}	$[m \cdot s^{-1}]$	charakteristische Strömungsgeschwindigkeit
\hat{v}_{end}	$[m \cdot s^{-1}]$	Endgeschwindigkeit bei der Plattenseparation
v_{max}	$[m \cdot s^{-1}]$	maximale Fließgeschwindigkeit
\hat{v}_{max}	$[m \cdot s^{-1}]$	maximale Separationsgeschwindigkeit
v_x	$[m \cdot s^{-1}]$	Strömungsgeschwindigkeit in x -Richtung

W	$[J]$	Arbeit
We	$[-]$	WEBER-Zahl
w	$[m]$	Wegstrecke der Tropfenoberfläche
x	$[m]$	Länge
y	$[m]$	Position in y -Richtung

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$\alpha_1; \alpha_2$	$[\circ]$	Krümmungswinkel von Oberflächenelementen
β	$[\circ]$	Kegelwinkel des Rotationsrheometers
$\dot{\gamma}$	$[s^{-1}]$	Schergeschwindigkeit (Scherrate)
$\dot{\gamma}_{xy}$	$[s^{-1}]$	Schergeschwindigkeit in x - u. y -Richtung
ε	$[-]$	HENCKY-Dehnung
ε_{ii}	$[-]$	Dehnung in x - u. y -Richtung
$\dot{\varepsilon}$	$[m \cdot s^{-1}]$	Dehngeschwindigkeit (\hat{v})
$\dot{\varepsilon}_0$	$[s^{-1}]$	konstant (auferlegte) Dehnrates
η	$[Pa \cdot s]$	Scherviskosität (dynamische Viskosität)
η_{110}	$[Pa \cdot s]$	Scherviskosität (bei $\dot{\gamma} = 110 s^{-1}$)
η_{1100}	$[Pa \cdot s]$	Scherviskosität (bei $\dot{\gamma} = 1100 s^{-1}$)
η_E	$[Pa \cdot s]$	Dehnviskosität
η_E^+	$[Pa \cdot s]$	vorübergehende (transiente) Dehnviskosität
θ	$[\circ]$	Kontaktwinkel
$\theta_1; \theta_2$	$[\circ]$	Kontaktwinkel bezogen auf den Flächenanteil
θ_{CB}^*	$[\circ]$	Kontaktwinkel nach CASSIE-BAXTER
θ_R	$[\circ]$	Rückzugswinkel
θ_V	$[\circ]$	Vorrückwinkel
θ_{VR}	$[\circ]$	Mittelung zwischen Vor- u. Rückzugswinkel
θ_W^*	$[\circ]$	Kontaktwinkel nach WENZEL
ϑ	$[\circ]$	Temperatur (Zeitbereich)
λ	$[s]$	Relaxationszeit

λ_c	$[m]$	Kapillarlänge (engl. capillary length)
λ_E	$[s]$	Relaxationszeit in Dehnung
ν	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	kinematische Viskosität
π	$[3,14]$	Kreiszahl
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	Dichte
ρ_{ch}	$[kg \cdot m^{-3}]$	charakteristische Dichte des Fluids
σ	$[J \cdot m^{-2}]$	Oberflächenspannung
σ^B	$[J \cdot m^{-2}]$	Benetzungsspannung
σ_L	$[J \cdot m^{-2}]$	Oberflächenspannung der Flüssigkeit
σ_{LS}	$[J \cdot m^{-2}]$	Grenzflächenspannung
σ_S	$[J \cdot m^{-2}]$	Oberflächenspannung des Festkörpers
σ_i^p	$[J \cdot m^{-2}]$	polarer Anteil der Oberflächenspannung
σ_i^d	$[J \cdot m^{-2}]$	disperser Anteil der Oberflächenspannung
$\sigma_{ii} ; \tau_{ii}$	$[Pa]$	Normalspannung in x -, y -, z -Richtung
$\boldsymbol{\tau}$	$[Pa]$	Extraspannungstensor
$\tau ; \tau_{xy}$	$[Pa]$	Schubspannung
τ_0	$[Pa]$	Grenzschubspannung ($\tau_0 = \tau_B$)
τ_B	$[Pa]$	Schubspannungsgrenze nach BINGHAM
τ_{ij}	$[Pa]$	Tangential- bzw. Schubspannung ($i \neq j$)
τ_N	$[Pa]$	Normalspannung
ω	$[s^{-1}]$	Kreisfrequenz

Indizes und Abkürzungen

Abb.	Abbildung
Bew.	Bewegung
ca.	circa
CCD	Charge-coupled Device
const.	constant/ konstant

CSI	Center of Smart Interfaces
DMS	Dehnungsmesselement
DPKL	Dreiphasenkontaktlinie
dt.	deutsch
dyn.	dynamisch
eng.	englisch
fps	frames per second
GB	Gigabyte
Gl.	Gleichung
IR	Infrarot
LAMS	Laser Ablation Mask System
LCoS	Liquid Crystal on Silicon
LED	light-emitting diode
Lit.	Literatur
Lm	Lumen (Lichtstrom)
M	Mechanismus
max.	maximal
mcd	milli Candela (Lichtstärke)
OWRK	Owens, Wendt, Rabel und Kaeble
Oberfl.	Oberfläche
RFID	radio-frequency identification
S.	Seite
SI	Système international d'unités
sec.	second
s.	siehe
sog.	sogenannte
sr	Steradian (Raumwinkeleinheit)
tats.	tatsächlich
theor.	theoretisch
u.	und
UV	Ultraviolett
VF	Viscous Fingering
v.	von
vgl.	vergleiche

z. B.

zum Beispiel

1. Einführung

Der klassische Druck der grafischen Industrie zur Erzeugung von Printmedien hat sich in den letzten Jahren stark verändert. Neben neuen Druckmethoden gibt es neue Anwendungsfelder wie das funktionale Drucken. Unter funktionalem Drucken (engl. functional printing) versteht man das Drucken von funktionalen Schichten. Ein Beispiel hierfür sind gedruckte elektrische Devices (dt. Bauelemente) wie Dehnungsmesselemente (DMS), Kondensatoren oder Antennenspulen. Diese Komponenten besitzen z. B. Reliefstrukturen, die sich mit einem konventionellen Druckverfahren unter Anwendung einer grafisch strukturierten Druckform applizieren lassen. Der Begriff „grafisch strukturiert“ bezeichnet eine Strukturierung der Druckform im makroskopischen Bereich. Diese grafischen Strukturen sind im Flexodruck erhaben und übertragen im Druckprozess die Farbe auf das Substrat.

Bei der Herstellung von elektrischen Devices im Flexodruck kommen grafisch strukturierten Linien der Druckform zum Einsatz. Abbildung 1.1 zeigt beispielhaft zwei Druckformen aus Fotopolymer, die zur Herstellung von Devices mit Reliefstrukturen angewendet werden.

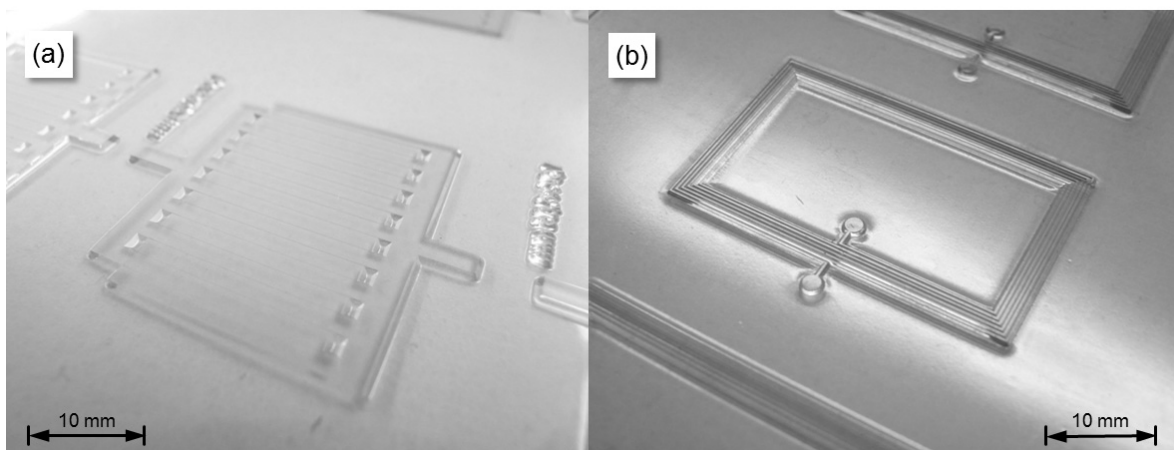


Abbildung 1.1: Darstellung von zwei Druckformen aus dem Flexodruck für das funktionale Drucken mit grafisch strukturierten Linien. Auf den zwei Druckformen werden die Reliefs von Kondensatoren (a) und Antennenspulen (b) gezeigt.

Die erhabenen Stellen der Druckform in Abbildung 1.1 sind grafisch strukturierte Linien, die makroskopisch die Geometrie von Kondensatoren bzw. Antennenspulen zeigen.

Im Druckprozess wird die funktionale Flüssigkeit von den erhabenen Linien der Druckform auf das Substrat übertragen. Die mikroskopisch strukturierte Oberfläche der erhabenen Linien der Druckform beeinflusst wesentlich die Verdruckbarkeit der funktionalen Flüssigkeiten. Die Änderung der mikroskopischen Strukturierung hat Einfluss auf das Benetzungsverhalten der darauf befindlichen Flüssigkeit. Das Benetzungsverhalten ist abhängig von den Adhäsionskräften zwischen Flüssigkeit und Festkörperoberflächen.

(z. B. Druckform und Substrat) und hat Einfluss auf die Farbspaltung, den Farbübertrag und die spätere Schichtausbildung.

Der Einfluss von mikroskopisch strukturierten Linien der Druckform auf die Farbspaltung und den Farbübertrag ist bisher nicht vertieft wissenschaftlich untersucht worden. Auch gibt es keine Erkenntnisse über die dabei auftretenden Phänomene.

Für die Weiterentwicklung des Flexodrucks für das funktionale Drucken ist es notwendig, dass der Druckprozess wissenschaftlich untersucht und verstanden wird. Deshalb wird in dieser Arbeit die Farbspaltung bei der Anwendung von mikroskopisch strukturierten Linien näher untersucht. Hierbei wird die parallele Plattenseparation angewandt, bei der die entstehenden Phänomene mit einer Highspeed-Kamera untersucht werden. Besonderheiten der Farbspaltung von unterschiedlichen Flüssigkeiten und unterschiedlichen Oberflächen der Druckform stehen dabei im Zentrum der Beobachtung und Analyse.

Die Kapitel dieser Arbeit gliedern sich wie folgt:

In Kapitel 2 werden die Grundlagen der Farbspaltung erklärt. Hierzu gehören auch die grundsätzliche Einordnung der Druckverfahren und eine Einführung in den Flexodruck. Dabei wird auf den Druckprozess und die Bedeutung der Druckform im Flexodruck eingegangen. Im Weiteren werden die für den Druckprozess wesentlichen Eigenschaften von Flüssigkeiten betrachtet. Hierbei werden Begriffe wie Viskosität und Oberflächenspannung näher erklärt. Es wird auch der aktuelle Stand der bisherigen Forschung bei der Flüssigkeitsspaltung betrachtet.

Im Anschluss daran folgt in Kapitel 3 die Zielsetzung und die Vorgehensweise dieser Arbeit.

In Kapitel 4 wird auf die Charakterisierung von Druckform und der in dieser Arbeit verwendenden Flüssigkeiten eingegangen. Es folgt gleichermaßen eine Betrachtung der Benetzbarkeit von Flüssigkeiten auf strukturierten Oberflächen im Flexodruck.

In Kapitel 5 wird auf den experimentellen Versuchsaufbau eingegangen und die Variierung der Versuchsparameter vorgestellt.

Die Versuchsergebnisse bei der Farbspaltung und die dabei auftretenden Phänomene sowie deren Abfolge werden in Kapitel 6 betrachtet, ausgewertet und diskutiert. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse dienen der Weiterentwicklung des Flexodrucks für die Anwendung von gedruckter Funktionalität.

In Kapitel 7 folgen die Zusammenfassung und der Ausblick dieser Arbeit.

Im Anschluss daran folgt ein Literaturverzeichnis in Kapitel 8 und ein Anhang mit Videoausschnitten der Highspeed-Aufnahmen, die eine experimentelle Grundlage dieser Arbeit darstellen.

2. Grundlagen der Farbspaltung

Im Kapitel Grundlagen der Farbspaltung wird der Druckprozess des Flexodrucks behandelt. In einem weiteren Schritt wird auf die Farbspaltung im Flexodruck eingegangen. Anschließend folgt der Übergang von dem eigentlichen Druckprozess hin zu den wissenschaftlichen Grundlagen dieser Arbeit. Hierzu werden die Themen Oberflächenspannung, Kapillarität, Rheologie, instabile Strömung und der Stand der Forschung bei der Flüssigkeitsspaltung gestreift.

2.1 Einordnung der Druckverfahren

In der grafischen Industrie werden Druckverfahren im Allgemeinen durch ihr Funktionsprinzip unterschieden. Eine grundsätzliche Einordnung des jeweiligen Druckverfahrens erlaubt die Betrachtung nach Viskosität und Oberflächenspannung der angewandten Druckfarben (*Abb. 2.1*). So wird deutlich, dass sich mit dem jeweiligen Druckverfahren nur bestimmte Druckfarben bzw. Flüssigkeiten abhängig von deren Oberflächenspannung und Viskosität verdrucken lassen [KIP00], [STA09].

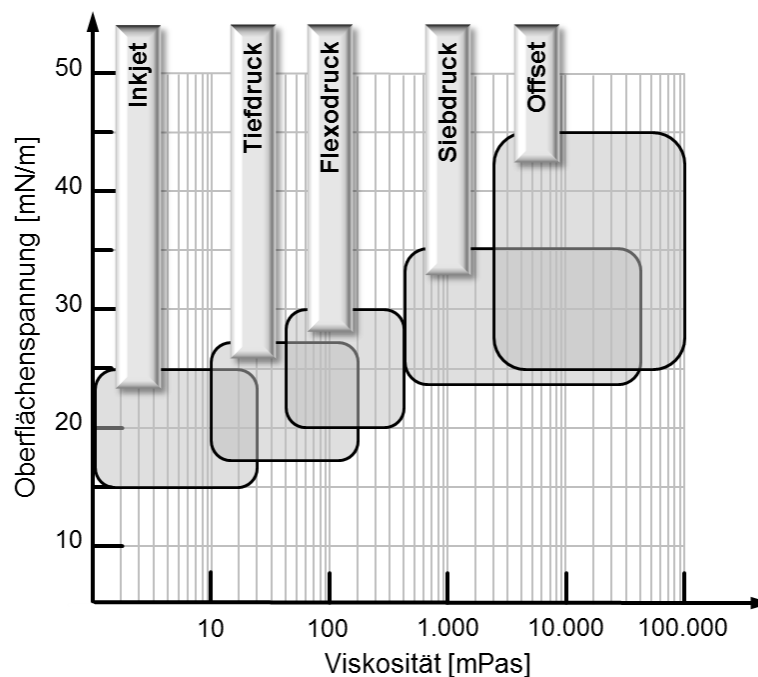


Abbildung 2.1: Einordnung der Druckverfahren in Bezug auf Oberflächenspannung und Viskosität der anwendbaren Farben bzw. Flüssigkeiten.

Die Abbildung 2.1 zeigt die umrandeten Bereiche in der eine Druckfarbe bezüglich Viskosität und Oberflächenspannung liegen muss. Die dazugehörigen Druckprozesse sind hier in grauen Säulen dargestellt. Der Flexodruck befindet sich im Mittelfeld was Viskosität und Oberflächenspannung angeht [STA09]. Die Begriffe Viskosität und Oberflächenspannung werden in Kapitel 2.3.2 und 2.4.1 behandelt.

Das Diagramm von Abbildung 2.1 vernachlässigt Größen wie die dynamische Oberflächenspannung, das viskoelastische Verhalten der Farbe und deren zeitliche Veränderung aufgrund chemischer und mechanischer Prozesse.

Dennoch muss diese Einordnung auch im Zusammenhang mit dem Funktionsprinzip des jeweiligen Druckverfahrens betrachtet werden. So werden je nach Funktionsprinzip bestimmte Festkörperoberflächen als Übertragungsmedium angewandt. Diese stehen in einer direkten Wechselwirkung mit den verwendeten Farben bzw. Flüssigkeiten. Ob eine Farbübertragung stattfindet, ist abhängig von der Interaktion der Festkörperoberfläche mit der Druckfarbe [DEU99], [HÜB91]. Das folgende Kapitel behandelt den Druckprozess im Flexodruck und zeigt weitere Mechanismen und Einflussgrößen der Farbübertragung.

2.2 Flexodruck

Der Flexodruck zählt zu den Hochdruckverfahren, bei denen die Druckfarbe bzw. die Flüssigkeit über die erhabenen Stellen der Druckform auf das Substrat übertragen wird. Definiert wird der Flexodruck in DIN 16514. Er unterscheidet sich im Vergleich zum Buchdruck, mit einer starren Druckform aus Blei-Antimon-Zinn, durch eine elastische Druckform aus Fotopolymer oder Gummi. Die Viskosität von konventionellen Flexodruckfarben liegt zwischen 50 und 500 *mPas* (bei 20 °C) [DEU99]. Im Bereich des funktionalen Druckens liegt die Viskosität der Fluide teilweise darunter, bis ca. 20 *mPas* [STA09]. Die Mindestschichtdicke, die man mit diesem Druckverfahren erzeugen kann, liegt bei wenigen 100 *nm*. Die maximale Schichtdicke reicht bei Lackschichten bis 10 μm . Eine durchschnittliche Maschine erreicht eine maximale Druckgeschwindigkeit von 250 *m/min*, was etwa 4,1 *m/s* entspricht. [DEU99], [KIP00], [NEU09], [STA09]. Der Flexodruck ist aus Sicht der grafischen Industrie vielseitig untersucht worden. Standardliteratur findet sich bei dem Verband der „Deutschsprachige Flexodruck-Fachgruppe e. V. (DFTA)“ [DEU99], [DEU07].

2.2.1 Druckeinheit

Die Druckeinheit im Flexodruck besteht in schematischer Darstellung aus der Kombination von Farbwerk bzw. Kurzfarbwerk und dem Druckwerk (*Abb. 2.2*). Die Farbe wird über zwei Walzen transportiert und anschließend auf das Substrat übertragen. Bei diesem Vorgang wird die Farbe dosiert, separiert und grafisch strukturiert. Die folgende Abbildung 2.2 veranschaulicht diesen Vorgang und zeigt den schematischen Aufbau einer Druckeinheit im Flexodruck. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass es neben der gezeigten Darstellung in Abbildung 2.2 weitere ganz unterschiedliche Bauformen der Druckeinheit im Flexodruck gibt [KIP00], [NEU09].

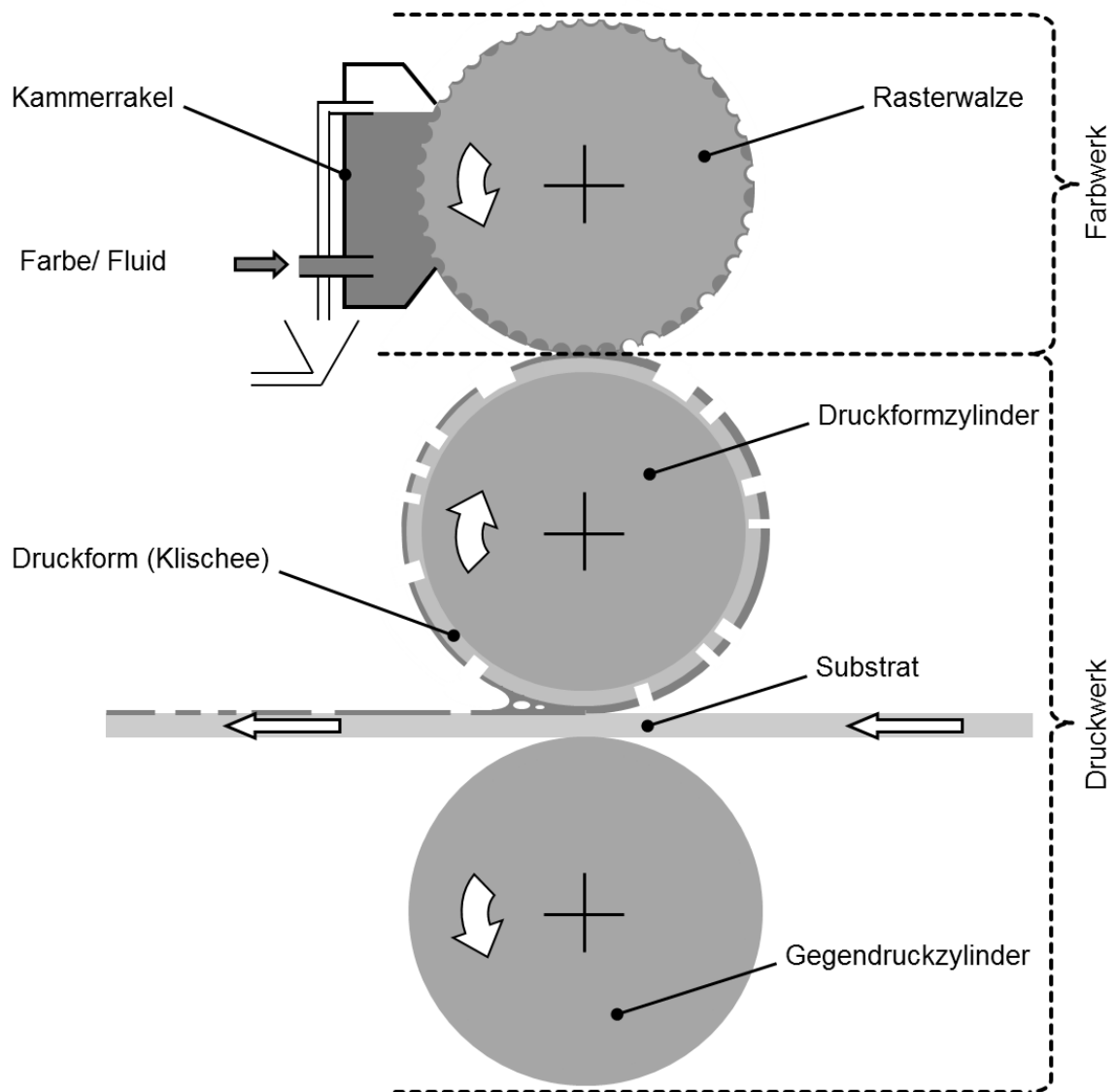


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung einer Druckeinheit im Flexodruck.

2.2.2 Druckprozess

Die Druckfarbe wird temperiert der Kammerrakel zugeführt. Die Kammerrakel selbst versorgt die Rasterwalze mit Farbe. Die Oberfläche der Rasterwalze besteht aus vielen Näpfchen, die durch das Eintauchen in die Farbe gefüllt werden. Durch Änderung der Farbzusammensetzung, der Temperatur von Farbe und Rasterwalze, sowie der Strukturierung der Näpfchen wird Einfluss auf das Farbaufnahmeverhalten der Rasterwalze genommen. Die Druckfarbe wird dann von der Rasterwalze auf den Druckformzylinder und die darauf befindliche Druckform (Klischee) übertragen. Dabei wird die Farbe nur an den erhabenen und grafisch strukturierten Stellen der Druckform angenommen. Die Druckform überträgt anschließend die Druckfarbe auf das Substrat. Neben der Vordosierung der Farbe durch die Kammerrakel und die Rasterwalze wird die

Druckfarbe auch in den Kontaktzonen der Walzen durch die Farbspaltung bei Separation der Oberflächen dosiert. Grund hierfür ist die unterschiedliche Beschaffenheit der Oberflächen, die einen direkten Einfluss auf die Farbspaltung und den Farbübertrag hat. Dieser Einfluss wirkt sich auch auf den Übertrag der grafisch strukturierten Farbe vom Klischee auf das Substrat aus. Durch die Farbspaltung unterliegt die Farbe mehreren mechanischen Beanspruchungen, wodurch sich ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften während des gesamten Prozesses ändern [DEU99], [KIP00], [NEU09], [STA09].

2.2.3 Rasterwalze

Die Rasterwalze überträgt durch ihre Näpfchen die Farbe von der Kammerrakel zum Druckformzylinder. Dabei wird zwischen zwei grundsätzlichen Arten von Rasterwalzen unterschieden. Diese sind Rasterwalzen mit beschichteten Keramikoberflächen oder mit beschichteten Chromoberflächen. Rasterwalzen mit Keramikoberflächen bestehen aus einem Stahlkörper, der durch ein Plasma mit Keramik beschichtet wird. Im Anschluss daran folgt die Lasergravur zur Erzeugung der Näpfchen. Die Rasterwalze mit Chromoberfläche besteht ebenfalls aus einem Stahlkörper, der zunächst verchromt wird. Danach folgt die Gravur der Näpfchen mit einem Diamantstichel. In einem weiteren Arbeitsschritt wird die Walze verchromt. Abhängig von der geometrischen Form und Anordnung der Näpfchen wird der Rasterwinkel zur Walzenachse angegeben (s. Abb. 2.3) [DEU99], [KIP00].

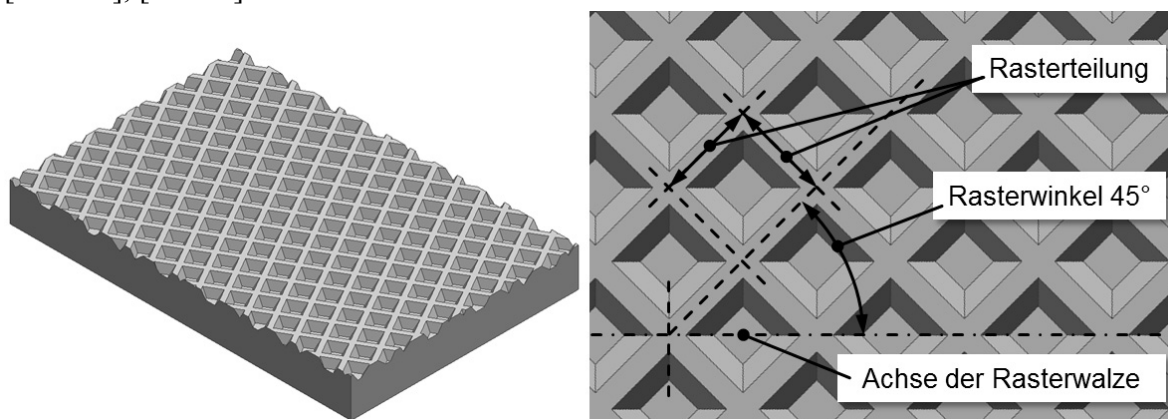


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Oberfläche einer Rasterwalze.

Die Näpfchen der Rasterwalze können ganz unterschiedliche Geometrieformen aufweisen. Beispiel hierfür sind Kegel- und Pyramidenform (vier- und sechseckig). Je nach geometrischer Form der Näpfchen gibt es Rasterwinkel, die sich in der Praxis bewährt haben. Bei einer Pyramidengeometrie (viereckig) liegt der Rasterwinkel bei 0° oder 45° (s. Abb. 2.3). Bei einer sechseckigen Form der Näpfchen und somit hexagonale Anordnung liegt der Rasterwinkel bei 30° oder 60° . Die Rasterwinkel von 45° und 60° werden als

Winkel in Spitzenlage bezeichnet. Die Farbe in der Kammerakel wird durch zwei Rakel bzw. Messer (Arbeitsrakel und Schließrakel) abgeschottet, um das Herausfließen der Farbe zu verhindern. Dabei liegt die Rakel fest an der Rasterwalze an. Bei Spitzenlage (von 45° und 60°) unterliegen die Rakel durch das Gleiten über die Oberfläche der rotierenden Rasterwalze einer geringen Wechselbelastung (s. *Abb. 2.2*) [DEU99], [EIS00], [HAA12].

Bei Betrachtung der Näpfchengeometrie von Rasterwalzen gibt es weitere Parameter, die variieren können. Zum Beispiel können Öffnungswinkel bzw. Flankenwinkel des Näpfchens, die Näpfchentiefe und somit auch die Näpfchengröße variieren. Zur Veranschaulichung dieser Zusammenhänge dient folgende Abbildung 2.4 [DEU99].

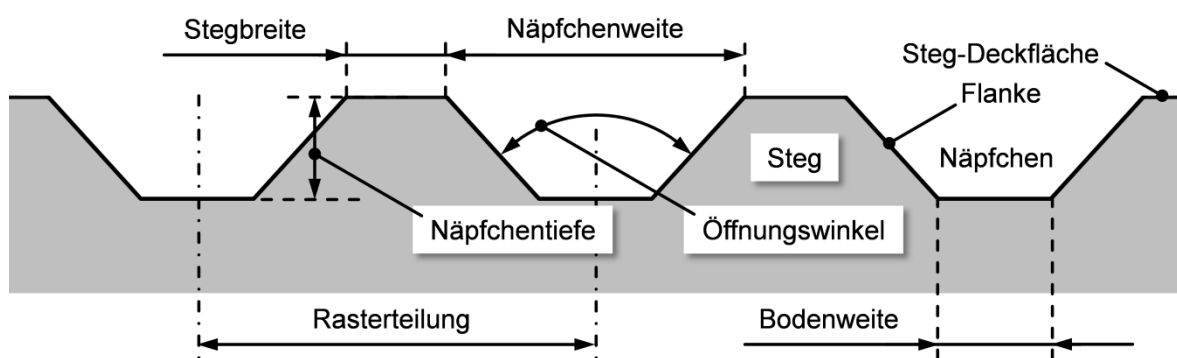


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines Querschnitts der Näpfchengeometrie von Rasterwalzen.

Die Größe der Näpfchen bzw. deren Näpfchenvolumen wird in der Praxis in ml/m^2 angegeben. Das Näpfchenvolumen von Rasterwalzen liegt zwischen $0,5$ bis 20 ml/m^2 . Die Rasterweite wird in Linien/cm angegeben und entspricht dem Kehrwert der Rasterteilung. Alle geometrischen Größen haben einen direkten Einfluss auf das Schöpfvolumen der Rasterwalze und somit auf deren Farbübertrag. Typische Rasterweiten sind 100 Linien/cm bis 500 Linien/cm [BOR12], [DEU99], [KIP00].

2.2.4 Druckform

Die elastische Druckform im Flexodruck bestehen im Allgemeinen aus Fotopolymer oder Gummi. Es gibt die weitere Unterscheidung von Druckplatte (Klischee) und Sleeve. Eine Druckplatte ist eine strukturierte Polymerfolie oder ein Gummituch, die auf dem Umfang des Druckformzylinders mittels doppelseitigem Klebeband (Klischeeklebeband) oder einer mechanischen Spannvorrichtung montiert werden. Dies wird durch Kleben oder Klemmen realisiert. Ein Sleeve hingegen ist eine zylindrische Druckformhülle. Diese wird nach dem Luftkissenprinzip auf den Druckformzylinder aufgezogen und per Kraftschluss auf der Walze fixiert. Die Druckform kann bei Druckplatte und Sleeve sowohl grafisch strukturiert als auch vollflächig sein. Hierzu gibt es zwei Definitionen bzw. Begrifflichkeiten, die in dieser Arbeit verwendet und an dieser Stelle erklärt werden. Eine „grafische

Strukturierung“ bezieht sich auf die Ausrichtung und Anordnung von Texten, Bildern und Formen. Sie umfasst alle makroskopisch erhabenen Stellen der Druckform. Betrachtet man diese erhabenen Stellen der Oberfläche mikroskopisch, so zeigt sich auf deren Oberfläche eine mikroskopische „Oberflächenstrukturierung“ (s. Abb. 2.5) [DEU99], [HOR03], [KIP00].

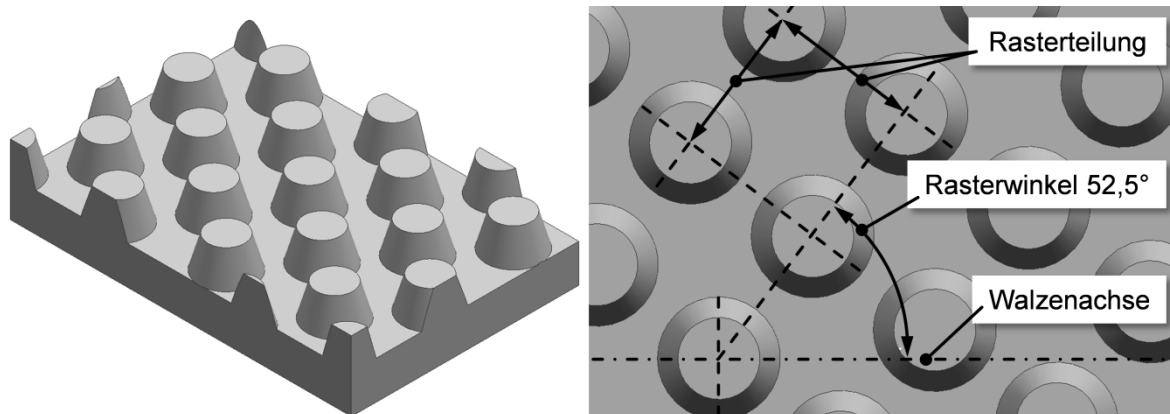


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der „Oberflächenstrukturierung“ der Oberfläche bzw. des Rasters der Druckform im Flexodruck.

Die Abbildung 2.5 zeigt eine Druckform mit einem Rasterwinkel bei $52,5^\circ$, wie er bei den Oberflächen dieser Arbeit angewandt wird. Standardwinkel sind 0° , 15° , 45° und 75° [BOS72], [DEU99], [KIP00].

Die mikroskopische Oberflächenstrukturierung erfolgt hier nach dem periodischen Raster (amplitudenmoduliert), das beim grafischen Bildaufbau verwendet wird. Die Bildpunkte sind im gleichen Abstand zueinander und besitzen die gleiche Form. Sie unterscheiden sich durch eine variable Punktgröße, der sogenannten druckenden Fläche. Die Oberflächenstrukturierung der Oberfläche zur Erzeugung der periodischen Rasterung kann ganz unterschiedlich sein. Die folgende Abbildung 2.6 zeigt eine schematische Darstellung der Oberflächenstrukturierung [DEU99], [HOR03], [KIP00].

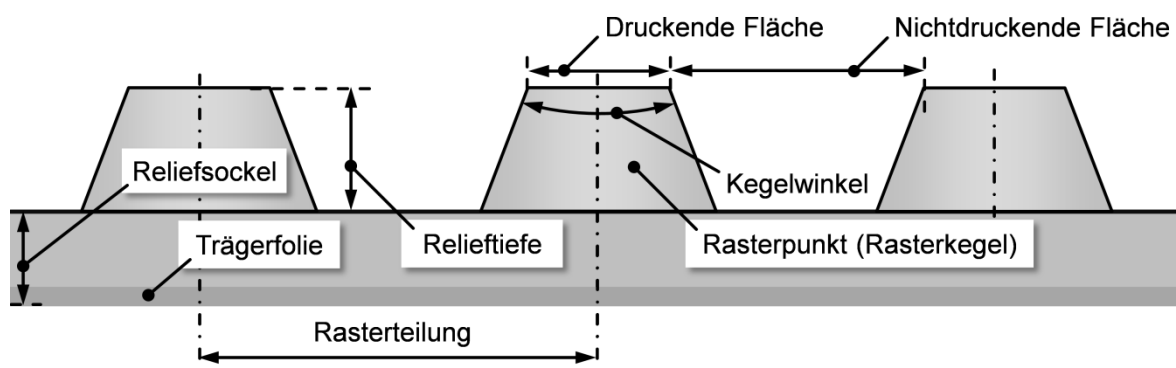


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung eines Querschnitts der „Oberflächenstrukturierung“ einer Oberfläche am Beispiel von Rasterpunkten der Druckform.

Die grafische Auflösung liegt zwischen 48 und 120 Linien/cm. Die Rasterweite der Druckform im Flexodruck ist in der Praxis ca. fünfmal geringer, als die der verwendeten Rasterwalze. Auch der Rasterwinkel der Druckform wird angepasst, um einen möglichen Moiré-Effekt zu vermeiden [BOS72], [DEU99], [KIP00].

Es gibt viele Arten zur Herstellung von Druckformen im Flexodruck. Unterschieden wird zwischen der analogen und digitalen Bebilderung. Ausgangsstoffe sind entweder entwickelbare Fotopolymere (fest oder flüssig) oder Elastomere. Bei Elastomeren wie z. B. Sleeveoberflächen wird mit einem thermischen Laserstrahl die Oberfläche direkt graviert. Diesem Verfahren gegenüber steht die Polymerisation von Fotopolymeren unter UV-Licht bei Wellenlänge von 100 nm bis 380 nm [OBE12].

Die der konventionellen Methode der Herstellung einer festen Fotopolymerplatte wird zunächst die Rückseite der Fotopolymerplatte mit UV-Licht ausgehärtet. Dann wird eine grafisch strukturierte Maske zwischen UV-Lichtquelle und die Vorderseite der Fotopolymerplatte gebracht. Das UV-Licht dringt durch die offenen Stellen der Maske. Hierbei härtet die Fotopolymerplatte an den Stellen aus, an denen das Licht auf die Fotopolymerplatte einwirkt. Die Maske kann sowohl analog als auch digital hergestellt werden. Bei der analogen Herstellung wird als Maske ein Film verwendet. Dieser ist vergleichbar mit Filmnegativen aus der Film- undameratechnik.

Anders erfolgt die digitale Direktbilderung. Hier befindet sich eine zusätzliche lasersensible Schicht auf der Fotopolymerplatte, die sogenannte LAMS-Schicht (Laser Ablation Mask System). Dadurch kann die Fotopolymerplatte direkt mit einem Laser grafisch strukturiert werden. Nach der Belichtung mit konventionellen Methoden folgt das Auswaschen der nicht vernetzten Fotopolymere mit Wasser. Bei diesem Auswaschvorgang können auch Bürsten zum Einsatz kommen. Im Anschluss danach folgt die Trocknung und Nachbelichtung, bei der die gesamte Fotopolymerplatte ausgehärtet wird [DEU99], [KIP00], [OBE12].

2.2.5 Druckfarbe

Bei Flexodruckfarben liegt die Viskosität zwischen 50 mPas und 500 mPas. Die Oberflächenspannung der Farben reicht von 20 bis 30 mN/m. Man unterscheidet zwischen Lösemittel-, wasserbasierten und UV-Farben oder Lacken. Der flüssige Zustand dient lediglich als Hilfe für den Übertragungsprozess. Nach der Übertragung soll der flüssige Zustand durch Verdunstung oder Polymerisation schnellstmöglich wieder aufgehoben werden. Farben, die lösemittel- bzw. wasserbasiert sind, trocknen durch deren Verdunstung durch die Umgebung, Heißluft oder IR-Strahlen. Zurück bleiben die zuvor gelösten bzw. suspendierten Farbstoffe oder nicht gelösten bzw. fein dispergierten Pigmente. Bei UV-Farben hingegen findet im Anschluss durch UV-Licht eine chemische Reaktion statt

(Polymerisation), die eine Aushärtung der gedruckten Farbschicht zur Folge hat. Hierbei unterscheidet man zwischen radikalischen und kationischen Systemen. Beim radikalischen System tritt eine schnelle Härtung bzw. Vernetzung auf, so lange, wie die UV-Strahlung angewandt wird. Das kationische System hingegen benötigt das UV-Licht nur für eine Startreaktion, welche die weitere Vernetzung kontinuierlich vorantreibt. Die dabei auftretende Schrumpfung der Schichtdicke liegt bei UV-Farben zwischen 3 und 20 %. Lösemittel- und wasserbasierte Farben schrumpfen stärker zwischen 60 und 80 %. Die Zusammensetzung der Flexodruckfarbe variiert stark. So bestehen lösemittel- und wasserbasierte Farben neben dem eigentlichen Lösemittel bzw. Wasser aus dem Farbmittel (Farbstoffe oder Pigmente), Additiven und Bindemittel. Bei einem Lack fehlt grundsätzlich nur der Anteil des Farbmittels. Eine UV-Farbe hingegen besteht im Wesentlichen aus einem Präpolymer (Monomer und Oligomer), das neben Photoindikatoren, reaktivem Verdünner, Additiven und Pigmenten fungiert [BEH93], [DEU07], [EIS00], [HAA12], [STA09].

2.2.6 Farbübertragung

Die Farbübertragung von Rasterwalze zu Druckformzylinder und weiter auf das Substrat hängt im Wesentlichen von den rheologischen Eigenschaften der Farbe und der Oberflächen der Walzen ab. Feste oder flüssige Oberflächen besitzen eine eigene Oberflächenspannung [mN/m], die bei Festkörpern auch Grenzflächenspannung genannt wird. Um eine optimale Übertragung der Farbe im Flexodruck zu gewährleisten, muss die Oberflächenspannung der Kontaktpartner mit dem Hauptfarbfluss ansteigen. Zur Verdeutlichung dient die folgende Abbildung 2.7 [BER99], [DEU99].

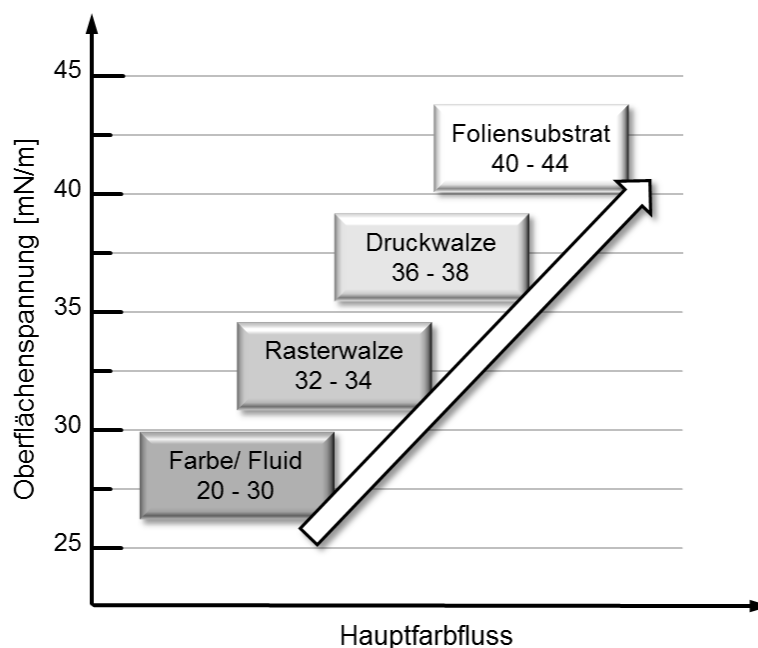


Abbildung 2.7: Anstieg der Oberflächenspannung der Kontaktpartner mit dem Hauptfarbfluss.

Mit dem Hauptfarbfluss der Farbe ist der kontinuierliche Transport der Farbe von Zuführung bis hin zum Substrat gemeint. Der weiße Pfeil in Abbildung 2.7 zeigt den Anstieg der Oberflächenspannung der Kontaktpartner bei fortgeschrittenem Transport der Farbe durch die Druckeinheit. Der Anstieg der Oberflächenspannung führt dazu, dass mehr Farbe über den Hauptfarbfluss transportiert wird, als über die Druckwalze bzw. Druckform und Rasterwalze durch die Farbspaltung zurück. [BER99], [DEU99].

Die Grenzflächenspannung der Druckform hat einen direkten Einfluss sowohl auf die Farbannahme der Rasterwalze als auch auf die Farbabgabe auf den Druckformzylinder und auf das Substrat. Sie beeinflusst sowohl die Druckqualität der Vollflächendeckung als auch die Tonwertzunahme und den daraus resultierenden Umfang des Farbraums [BER99], [DEU99].

Andere Parameter wie Kontaktzeit und Anpressdruck (Druckspannung), die in der Literatur häufig genannt sind, haben auch einen Einfluss auf den Farbübertrag. Es werden z. B. durch den Anpressdruck die Rasterpunkte der Druckform verformt. Dies führt zu einer Änderung der Oberflächenstrukturierung der Oberfläche. Dadurch ändern sich die Adhäsionskräfte und das Benetzungsverhalten der Druckfarbe auf der Druckform. Untersuchungen hierzu zeigen, dass die geometrische Form der Rasterpunkte, sowie die Materialeigenschaften der Druckform und die Verformung der Rasterpunkte einen hohen Einfluss auf die vorliegende Benetzung der Druckfarbe haben. In der Industrie ist das Phänomen der Verformung der Rasterpunkte bekannt. Dies bewirkt ebenso eine Vergrößerung der Übertragungsfläche der Rasterpunkte. Um diesen Effekt zu kompensieren, werden Rasterpunkte kleiner hergestellt [BER99], [BOU04], [BRÖ97], [DEU99], [GLÜ79], [MIC99], [WIE83].

2.2.7 Farbspaltung

Der Begriff Farbspaltung wird häufig in der drucktechnischen Industrie verwendet. In anderen Forschungsfeldern wird auch der Begriff Flüssigkeits-, Film- oder Schichtspaltung (engl. Film Splitting) verwendet. Hierbei handelt es sich grundsätzlich um die dynamische Separation zweier Festkörperoberflächen, zwischen denen ein Flüssigkeitsfilm gespalten wird. Dabei bilden sich Filamente aus. Andere Begriffe in der Forschung, die diesem Prinzip gleichzusetzen sind oder thematisch ähneln, sind Flüssigkeitsbrücken (engl. Liquid Bridge) und die Filamentdehnung (engl. Filament Stretching) [BEH93], [HÜB91], [MCK02].

Bei der Separation von Oberflächen treten bei den dazwischen befindlichen Farben ganz unterschiedliche Strömungsvorgänge und Phänomene, wie z. B. Instabilität, Scherung und die Filamentbildung auf. Hierauf wird in Kapitel 2.5 und 2.6 näher eingegangen.

Bei der Farbspaltung werden die auftretenden Strömungsformen der Farbe in zwei Kategorien eingeteilt. Diese sind die „reine Schichtspaltung“ bzw. Filmspaltung, wie sie bei Volltonflächen auftritt und für Beschichtungsprozesse von Bedeutung ist und in die „Spaltung einzelner Druckpunkte“ bzw. Punktspaltung, wie sie bei der Informationsübertragung beim grafischen Druck vorkommt [BEH93]. Eine weitere Art der Bezeichnung dieser Strömungsformen ist die Einteilung nach Klassen. Diese bezieht sich auf die übertragene Farbmenge. Hierbei wird unterschieden zwischen einer hohen Farbschicht „erster Klasse“, was der „Filmspaltung“ entspricht und einer geringen Farbschicht „zweiter Klasse“, die wiederum mit der „Punktspaltung“ gleichzusetzen ist [HÜB91]. Eine weitere Betrachtung bezieht sich auf das Nachfließverhalten der entstehenden instabilen Strömung. Hier wird die Punktspaltung als ein System „erster Ordnung“ und die Filmspaltung ein System „zweiter Ordnung“ verstanden [DÖR12].

Zur Verdeutlichung der Farbspaltung im Flexodruck wird auf die Farbspaltungsvorgänge in der Druckeinheit eingegangen. Hierzu dienen die nun folgenden Abbildungen 2.8, 2.9, 2.10, 2.11. In diesen Abbildungen wird verdeutlicht, welcher Typ der Farbspaltung vorliegt, welche Farbspaltungsvorgänge auftreten und wie die Farbe übertragen wird.

Die folgende Abbildung 2.8 veranschaulicht die Punktspaltung zwischen Rasterwalze und Druckform.

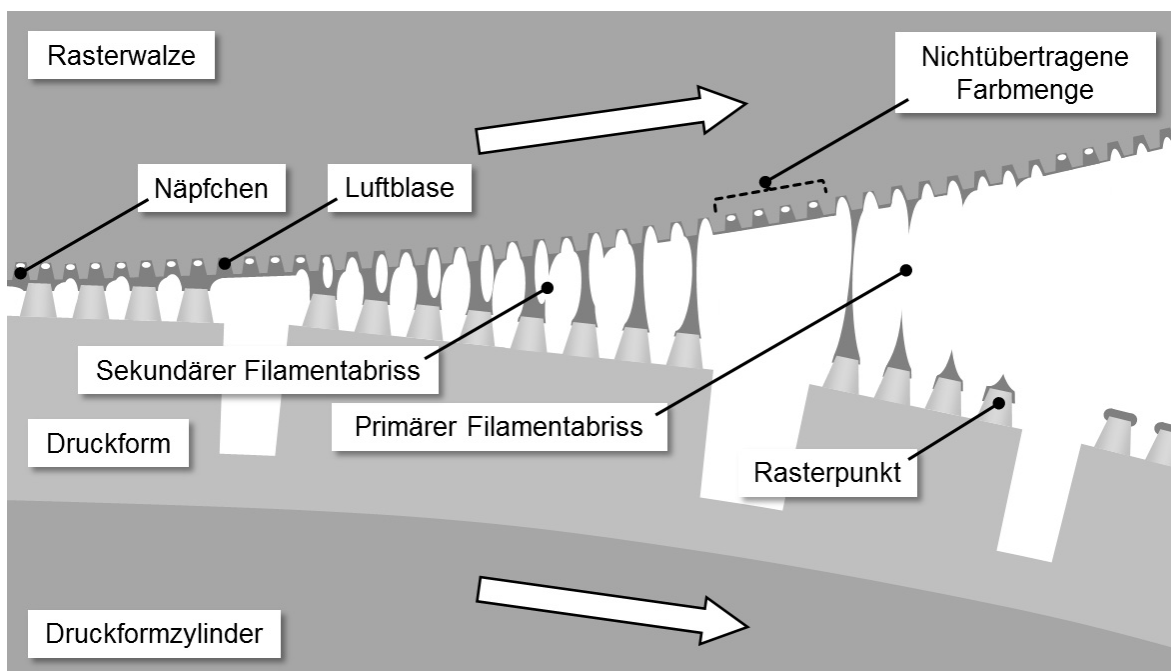


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der Punktspaltung zwischen Rasterwalze und Druckform.

Hierbei färbt die Rasterwalze nur die erhabenen Stellen, die sogenannten Rasterpunkte der Druckform ein. Dabei werden nicht alle Nöpfchen der Rasterwalze entleert, da die Rasterpunkte die Rasterwalze nicht an jeder Stelle berühren. Wie dieser Vorgang der Entleerung genau abläuft, ist nicht bekannt. Es wird davon ausgegangen, dass auch Druckfarbe zwischen den Rasterpunkten aufgenommen wird, was in der schematischen

Darstellung in Abbildung 2.8 allerdings vernachlässigt wird. Es ist bekannt, dass sich in den Nöpfchen Luftblasen befinden und bei der Farbspaltung nicht die ganze Druckfarbe aus den Nöpfchen entleert wird. Durch die Farbspaltung wird die zur Verfügung gestellte Farbmenge der Rasterwalze gespalten, wodurch nur ein Teil der Druckfarbe auf die Druckform übertragen wird. Es wird ebenfalls angenommen, dass es bei der Filamentbildung zur Entstehung von Primär- und Sekundärfilamenten kommt (s. Abb. 2.8). In der Literatur gibt es keine Untersuchungen, die die Entstehung von Primär- und Sekundärfilamenten belegen. Dennoch wird dieses Verhalten der Filamentbildung an dieser Stelle als eine realistische Möglichkeit angenommen, was die Untersuchungen und Beobachtungen dieser Arbeit untermauern.

Die Druckfarbe wird über den im Uhrzeiger-Sinn rotierenden Druckformzylinder transportiert und auf das bewegte Substrat durch die Farbspaltung übertragen. Dies wird mit Abbildung 2.9 veranschaulicht.

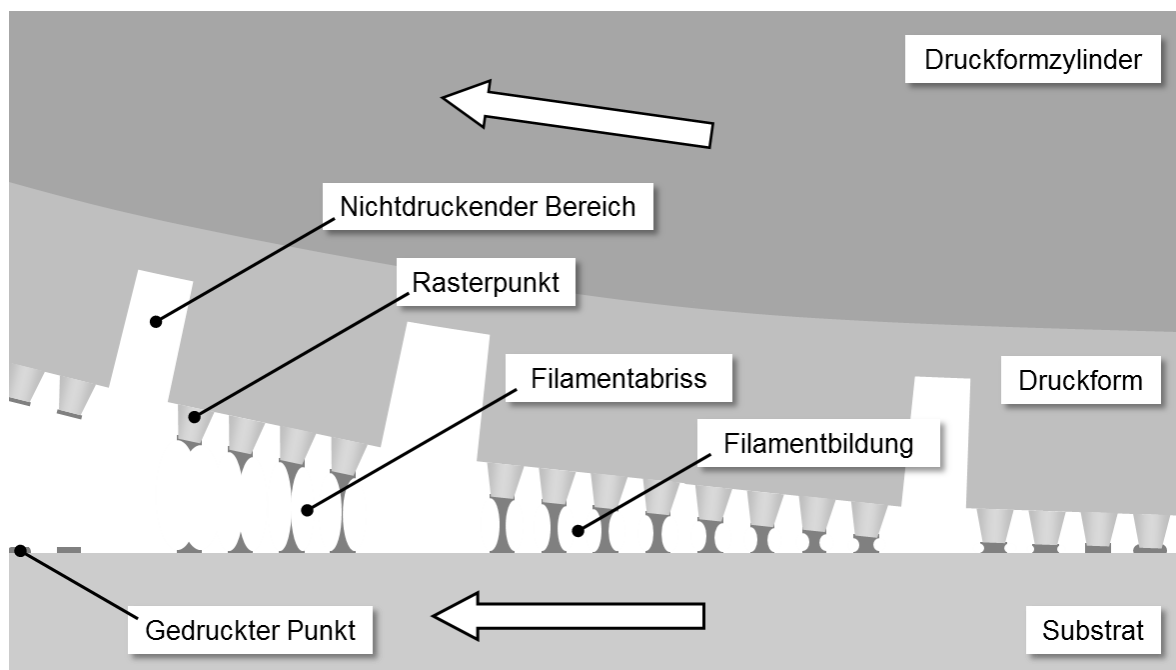


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Punktsplattung zwischen Druckform und Substrat.

In Abbildung 2.9 ist der Filamentabriss einzelner Filamente bei der Punktsplattung zu sehen [HÜB91]. Es wird bei der schematischen Darstellung eine mögliche Instabilität in den einzelnen Filamenten vernachlässigt, wie sie BEHLER [BEH93] untersuchte.

Genau wie bei Abbildung 2.8 findet in Abbildung 2.9 eine „Punktsplattung“ statt. Betrachtet man den Farbübertrag von der Druckform auf das Substrat in Abbildung 2.9, so ergibt sich ebenfalls eine Verringerung der Farbschicht durch den Vorgang der Farbspaltung. Auf den Rasterpunkten der Druckform verbleibt ein Teil der Farbe und wird auf dem Druckformzylinder zurücktransportiert.

Beim Übertrag von Volltonflächen wie sie z. B. bei Beschichtungs- und Lackierprozessen auftritt, entsteht grundsätzlich immer eine Filmsplattung (s. Abb. 2.10). Von

WAGENBAUER [WAG64] wurde der Filamentabriss bei der Filmspaltung beobachtet. Die folgende Abbildung 2.10 zeigt die Farbspaltung eines Flüssigkeitsfilms beim Übertrag der Farbe von der Rasterwalze auf den Druckformzylinder.

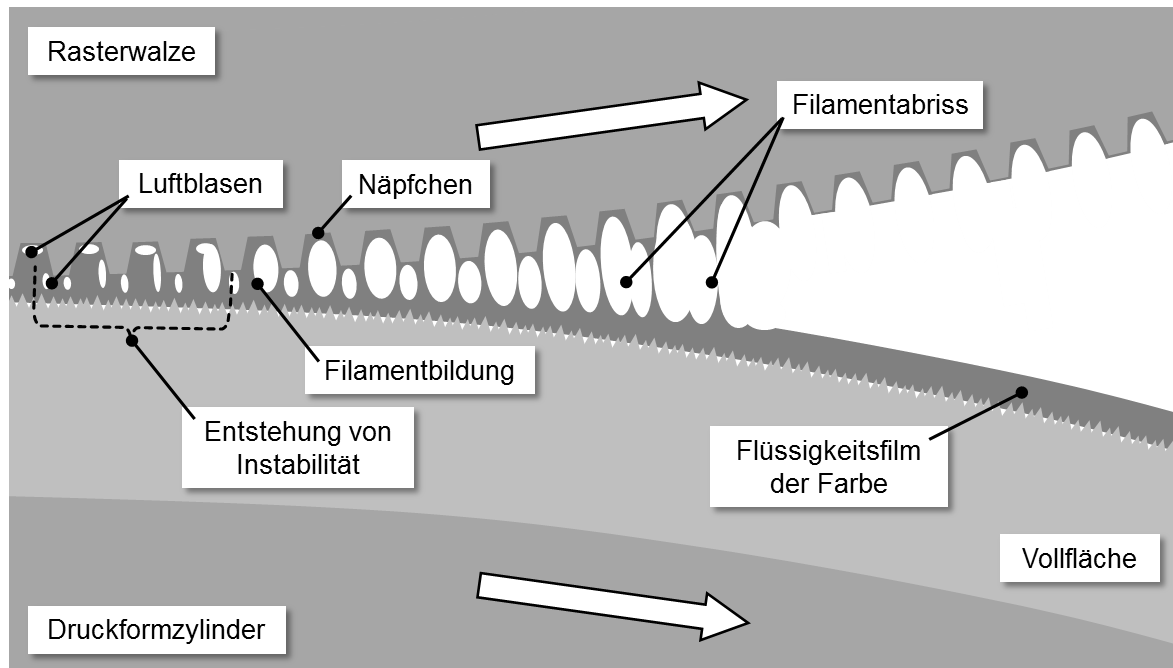


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung der Filmspaltung zwischen Rasterwalze und Druckformzylinder.

Bei der schematischen Darstellung der Filmspaltung in Abbildung 2.10 wird gezeigt, wie Luftblasen in den Spalt zwischen Rasterwalze und Druckformzylinder eingetragen werden. Die Entstehung dieser Luftblasen unterliegt ganz unterschiedlichen Mechanismen. Wird bei der Farbspaltung der Dampfdruck der Druckfarbe unterschritten, können sich Kavitationsgebiete erschließen. Dies geschieht durch einen auftretenden Unterdruck, bei dem nur eine minimale Temperatur bzw. Wärmeenergie erforderlich ist, um die Farbe zum Sieden zu bringen. Hierdurch kann die Flüssigkeit stationär verdampfen und es bilden sich Blasen, sogenannte Kavitationsblasen. Der Vorgang der Farbspaltung dauert ca. 1 ms. Es wird daher angenommen, dass diese Zeit nicht ausreicht, damit sich Kavitationsblasen im nennenswerten Maße bilden [BEH93]. Dennoch treten kurzzeitig erhebliche negative Drücke auf. Allerdings können auch Flüssigkeiten durchaus Zugspannungen übertragen und dadurch Drücke abbauen [BEH93], [BRI50], [BRÖ97], [TAY63].

Unabhängig von möglichen Kavitationsblasen gibt es auch andere Arten von Blasen in der Kontaktzone der Walzen. So werden z. B. durch die Rasterwalze Luftblasen durch die Nöpfchen eingetragen (s. Abb. 2.8 u. 2.10). Diese Luftblasen werden durch Fülleffekte der Kammerrakel hervorgerufen. Die Blasen beeinflussen die Farbübertragung aus den Nöpfchen heraus und den Vorgang der Farbspaltung.

Eine weitere Art von Luftblasen, die in der Kontaktzone der Walzen auftreten, entstehen durch Instabilität beim Einsaugen der Farbe bzw. der Flüssigkeit in die Kontaktzone. Die

dabei auftretende Instabilität ist mit dem Prinzip von SAFFMAN-TAYLOR vergleichbar [BOR12], [BRE03], [SAF58], [XIU06].

Alle Arten von Blasen sowie Kapillar- und Zähigkeitskräfte nehmen in den Kontaktzonen der Walzen Einfluss auf die Farbspaltung. In Abbildung 2.10 wird deutlich, wie die Farbe aus den Nöpfchen herausfließt und sich Filamente bilden. Die Entstehung der Filamente in Abbildung 2.10 ist auf die Instabilität nach SAFFMAN-TAYLOR zurückzuführen [BEH93], [BER99], [CAS94], [FOR77], [GLÜ79], [GRI99], [KON98], [MCK02], [VAR02], [WAG64].

Die Filamente in Abbildung 2.10 werden immer länger und schnüren ein, bis es schließlich zum Filamentabriss kommt. Dabei kommt es zur eigentlichen Farbspaltung bzw. in diesem Fall Filmspaltung. Der Flüssigkeitsfilm der Farbe wird über den Druckformzylinder in Rotationsrichtung zum Druckspalt transportiert. Im Druckspalt wird die Farbe von der Vollfläche des Druckformzylinders auf das Substrat übertragen. Dabei findet wie bei Abbildung 2.10 eine Filmspaltung statt. Die folgende Abbildung 2.11 zeigt den Übertrag des Flüssigkeitsfilms der Farbe auf das Substrat und die dabei auftretende Filmspaltung.

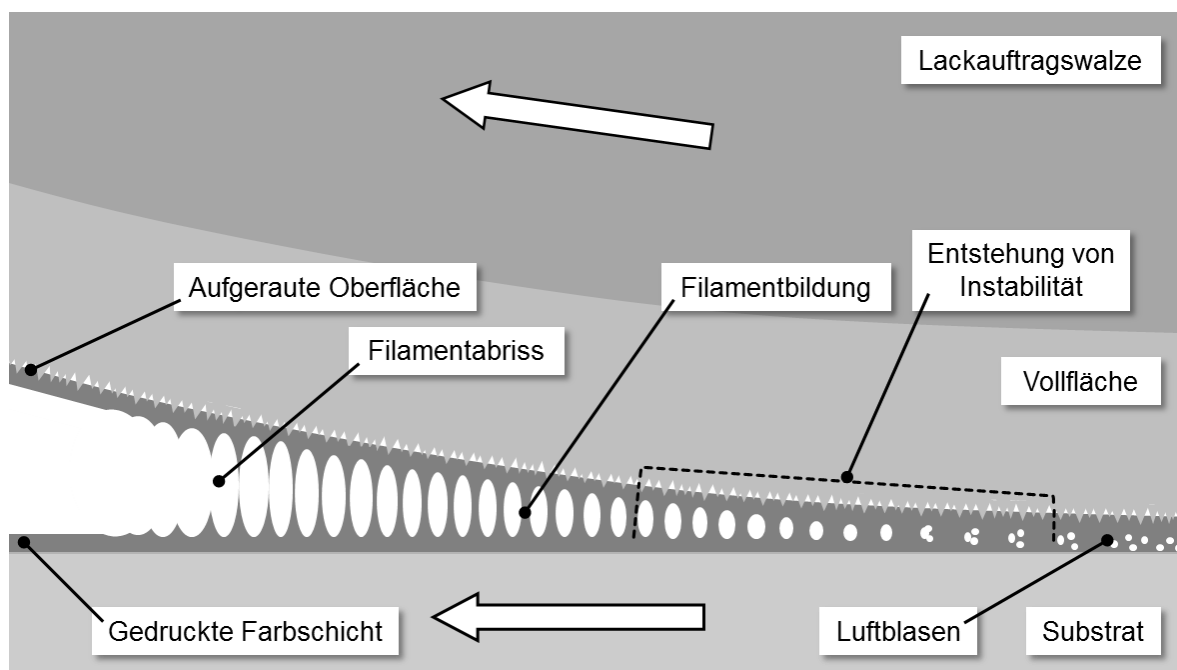


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung der Filmspaltung zwischen Druckformzylinder und Substrat.

In Abbildung 2.11 ist gleichermaßen die Filamentbildung aufgrund von Instabilität dargestellt. Auch hier werden die Filamente länger und schnüren immer weiter ein, bis sie schließlich abreißen. Hierbei kann es zur Bildung von kleinen freien Farbtropfen in der Atmosphäre kommen. Diese entstehen durch das schnelle Zerreißen der Fäden, wodurch sich die Tropfen von den Fäden ablösen. Dies wird in der Praxis auch als Farbnebel bezeichnet. Durch das Zurückziehen der Filamentenden entsteht zunächst eine inhomogene Farbschicht auf dem Substrat, auch Schichtdickenschwankung genannt. Diese Schicht

glättet sich über der Zeit ein, sofern keine grundsätzliche Entnetzung auf dem Substrat vorliegt [BEH93], [BOS72], [DEV04], [FOR98], [JAM09], [WAG64], [WEI12].

Bei der Filmspaltung, wie sie in Abbildung 2.10 und 2.11 zu sehen ist, spielen Oberflächeneffekte der festen Oberflächen (wie z. B. mikroskopische Strukturierung und Grenzflächenspannung) nur eine geringe Rolle. Dies liegt daran, dass die Schichtdicke (ca. $10\text{ }\mu\text{m}$) im Verhältnis viel größer ist als die Wirklänge der Oberflächenkräfte (wenige nm) [HÜB91], [WIR63].

2.2.8 Funktionales Drucken

Die Drucktechnik ist ein Verfahren, mit dem man strukturiert additiv beschichtet. Es eignet sich sowohl für die grafische Industrie zur Herstellung von grafischen Druckprodukten als auch für die Herstellung von gedruckter Funktionalität. Man spricht hier vom funktionalen Drucken (engl. functional printing). Die Besonderheit bei funktionalen Druckerzeugnissen ist die Herstellung von geschlossenen funktionalen Schichten (Vollflächen). Erzeugnisse beim funktionalen Drucken können z. B. elektrische Bauteile wie Sensoren oder deren Kontaktierung sein. Die folgende Abbildung 2.12 zeigt gedruckte Dehnungsmesselemente (DMS), die mit dem Siebdruckverfahren hergestellt werden.

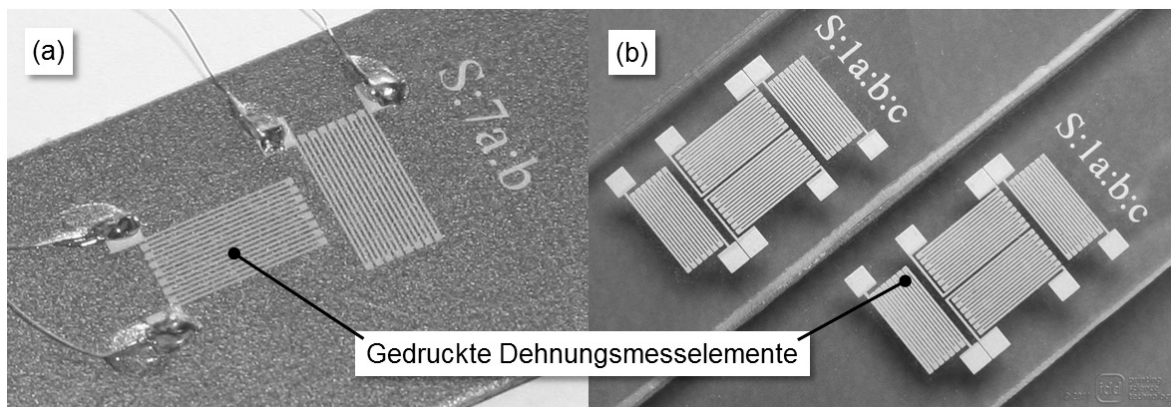


Abbildung 2.12: Darstellung von Dehnungsmesselementen (DMS) auf Automobilblech mit Isolationsschicht (a) und auf Plexiglas (b) [RAU12].

Zur Herstellung der Dehnungsmesselemente in Abbildung 2.12 wird als funktionale Flüssigkeit eine Silbersuspension verwendet. Die Linien des Messgitters sind $150\text{ }\mu\text{m}$ breit und $20\text{ }\mu\text{m}$ dick [RAU12]. Die Herausforderung bei der Herstellung solcher Dehnungsmesselemente ist eine gleichmäßige Linienbreite und eine definierte Schichtdicke. Funktionale Flüssigkeiten besitzen je nach Anwendungsfeld ganz unterschiedliche Eigenschaften. Diese sind meist abhängig von dem eigentlichen Herstellungsprozess der funktionalen Flüssigkeit und haben einen Einfluss auf deren physikalische Größen. Diese Größen sind z. B. Viskosität und Oberflächenspannung. Nicht alle Flüssigkeiten sind daher verdruckbar (s. Abb. 2.1 auf Seite 3). Um diese Flüssigkeiten

trotzdem zu verdrucken, muss die mikroskopische Oberflächenstrukturierung der Druckform im Flexodruck angepasst werden. Es wird daher vermutet, dass die Anpassung von Materialeigenschaften und der Oberflächenstrukturierung der erhabenen Stellen der Druckform, die Verdruckbarkeit aller Arten von Flüssigkeiten im Flexodruck ermöglicht. Hierzu muss man die Grenzflächenspannung und die Oberflächenstrukturierung der Druckform an die Flüssigkeit anpassen. Dies hat wiederum einen Einfluss auf die Benetzung und die Anhangskraft der Flüssigkeit auf der Druckform. In dieser Arbeit wird dies durch eine Änderung der Oberflächenstrukturierung der erhabenen Stellen der Druckform erreicht. Die variable Rasterweite, der Rasterwinkel und der Tonwert der Druckform können verändert und genutzt werden, um die Benetzung von komplexen funktionalen Flüssigkeiten auf der Druckform zu erzielen. Die folgende Abbildung 2.13 zeigt die Filmspaltung unter Anwendung sowohl einer makroskopischen bzw. grafischen Strukturierung, als auch die mikroskopische Oberflächenstrukturierung der Druckform.

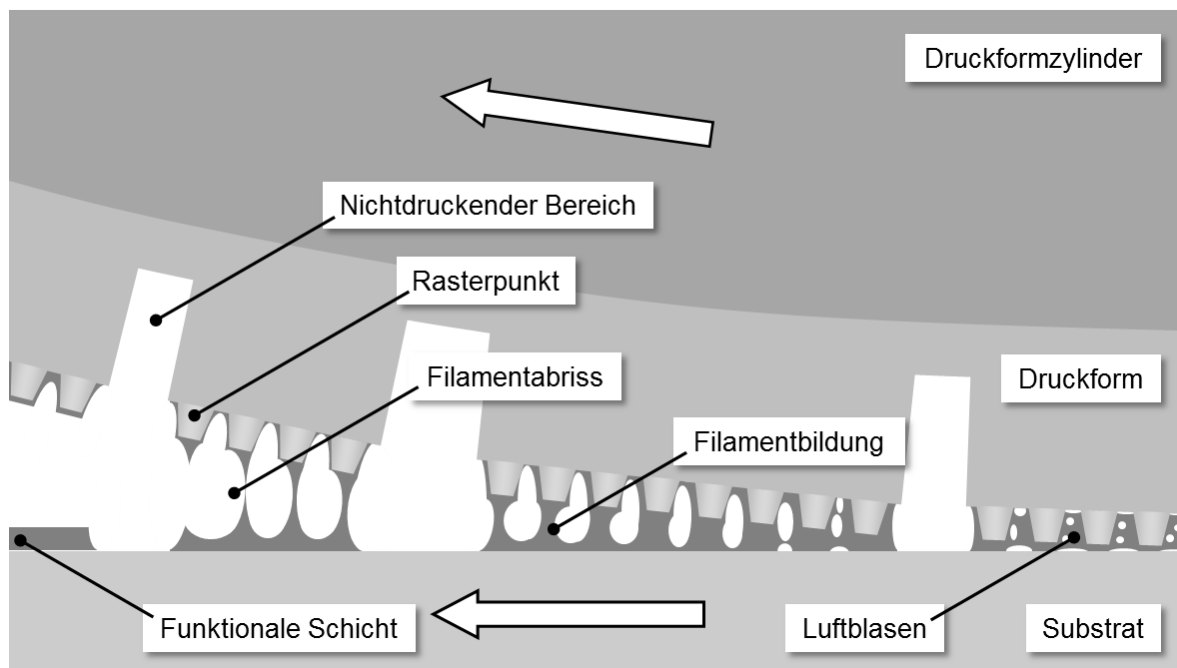


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung der Filmspaltung zwischen Druckformzylinder und Substrat bei der Anwendung von funktionalen Flüssigkeiten.

In Abbildung 2.13 wird gezeigt, wie sich die Filmspaltung von funktionalen Flüssigkeiten darstellt. Nach der Farbspaltung glättet sich der Flüssigkeitsfilm ein. Damit ein definierter Flüssigkeitsübertrag stattfindet, muss man die Farbspaltung und Filamentbildung verstehen. Hierzu müssen sowohl die physikalischen Eigenschaften von Farben als auch der Druckform bekannt sein. Auf die Grundlagen von Adhäsion und Benetzung von Flüssigkeit wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

2.3 Grundlagen der Adhäsion und Benetzung

Im vorliegenden Kapitel wird auf die theoretischen Grundlagen in Bezug auf Adhäsion, Oberflächen- bzw. Grenzflächenspannung, Kontaktwinkel, Benetzung und Kapillarität eingegangen, sowie auf die Methoden ihrer Bestimmung.

2.3.1 Intermolekulare Kräfte in Flüssigkeiten

Die Teilchenkräfte (Atom- bzw. Molekularkräfte), die zwischen Atomen bzw. Molekülen von Stoffen gegenseitig ausgeübt werden, beruhen auf der Massenanziehung. Diese Teilchenkräfte sind bei Fluiden sehr viel kleiner als bei Festkörpern, da keine Gitterstruktur vorhanden ist und sich die Teilchen gegeneinander verschieben lassen. Die Anziehungskräfte zwischen gleichen Teilchen werden als Kohäsionskräfte (Zusammenhangskräfte) und zwischen verschiedenen Teilchen als Adhäsion- und Adsorptionskräfte (Anhangskräfte) bezeichnet. Flüssigkeiten stehen ohne die Einwirkung äußerer Kräfte unter einem gleichbleibenden Druck und können als isobar betrachtet werden. Dieser Druck beruht auf dem kinetischen Druck und dem Kohäsionsdruck. Der kinetische Druck p_{kin} entsteht aufgrund der Bewegung der Moleküle und wird gesetzmäßig mit [CUN74], [MOC04], [SIG12], [STE09]:

$$p_{kin} = c \cdot \tilde{R} \cdot T \quad (\text{Gleichung 2.1})$$

definiert. Für die molare Stoffmengen- bzw. Teilchenzahldichte gilt $c = N/V$, wobei N die Teilchenzahl und V das Volumen darstellen. Die Gaskonstante wird mit \tilde{R} und die Temperatur mit T bezeichnet. Der kinetische Druck ist in Flüssigkeiten entsprechend sehr viel höher als in Gasen. Dies wird bei Flüssigkeiten durch den Kohäsionsdruck ausgeglichen. Zur Verdeutlichung dient die folgende Abbildung 2.14.

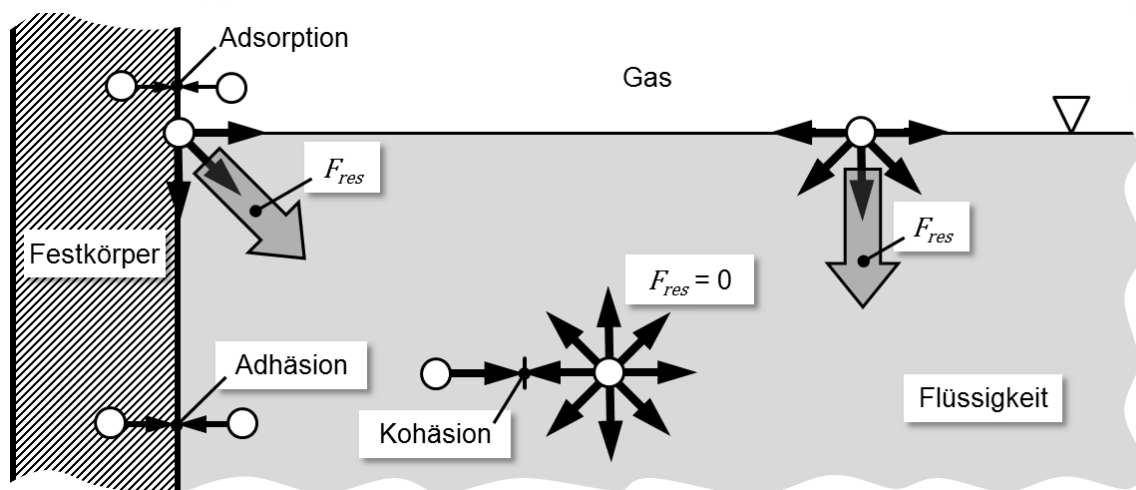


Abbildung 2.14: Schematische Darstellung von Kräften in Flüssigkeiten und zu angrenzenden Medien.

So liegt bei Flüssigkeit und Gas ein gleich großer resultierender Druck vor [CUN74], [MOC04], [SIG12], [STE09].

Die zwischenmolekularen Kräfte der Flüssigkeit kompensieren sich im Inneren durch die Anziehung der Nachbarmoleküle. Anders ist es bei den Oberflächenmolekülen, da diese nur teilweise von Nachbarmolekülen umgeben sind. Hierdurch erfahren die Oberflächenmoleküle eine resultierende Zugkraft F_{res} ins Innere der Flüssigkeit. Diese Kraft äußert sich in einer tangentialen Spannung zur Oberfläche, die als Oberflächenspannung bezeichnet wird. Die resultierende Zugkraft bzw. Kohäsionskraft versucht, die Oberfläche zwischen Flüssigkeit und Gas möglichst klein zu halten. Diese Oberfläche bzw. Grenzfläche wird auch „freie Oberfläche“ genannt [BOH02], [MEI03], [MEI06], [MOC04], [SIG12].

2.3.2 Oberflächen- bzw. Grenzflächenspannung

Nach YOUNG wird die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit über die zur Vergrößerung der Oberfläche erforderliche Energie hergeleitet. Hierzu dient ein Versuchsaufbau, der in Abbildung 2.15 schematisch dargestellt ist [BOH02], [CUN74], [MEI03]:

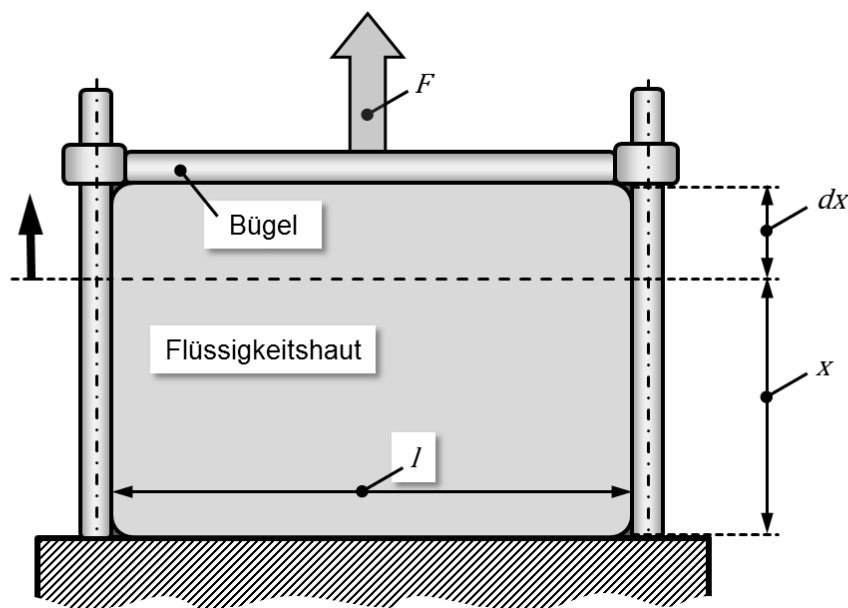


Abbildung 2.15: Schematischer Versuchsaufbau zur Bestimmung der Oberflächenspannung nach YOUNG mit angreifender Kraft F , Bügellänge l , Höhe x und Verschiebestrecke bzw. Weglänge dx .

Die Abbildung 2.15 zeigt den Versuch nach YOUNG. Durch die Bewegung des Bügels vergrößert sich die Oberfläche der Flüssigkeitshaut (auf Vorder- wie Rückseite). Dadurch ergibt sich eine Vergrößerung der Fläche zu $dA = 2 \cdot l \cdot dx$. Die Arbeit dW , die zu leisten ist, entspricht dem Produkt aus angreifender Kraft F und Weglänge dx bzw. der

Oberflächenspannung σ , um eine Flächenvergrößerung dA zu erzeugen (Gl. 2.2) [BOH02], [MEI03]:

$$dW = F \cdot dx = \sigma \cdot dA = \sigma \cdot 2 \cdot l \cdot dx \quad (\text{Gleichung 2.2})$$

Daraus ergibt sich die Gleichung der Oberflächenspannung

$$\sigma = \frac{F}{2 \cdot l} \quad \text{bzw.} \quad F = \sigma \cdot 2 \cdot l. \quad (\text{Gleichung 2.3})$$

Eine andere Art die Oberflächenspannung herzuleiten, ist über die thermodynamische Energie (freie Enthalpie nach GIBBS) [BOH02], [MEI03]. Eine Änderung der Enthalpie \hat{G} hängt von der Temperatur T , dem Druck p und der Größe der Ober- bzw. Grenzfläche A ab.

$$\hat{G} = f(T, p, A) \quad (\text{Gleichung 2.4})$$

Dabei wird in Gleichung 2.4 die molare Stoffmenge n vernachlässigt. Für das gesamtheitliche Differenzial der freien Enthalpie gilt [BOH02]:

$$dG = \left(\frac{\delta \hat{G}}{\delta T} \right)_{p,A} dT + \left(\frac{\delta \hat{G}}{\delta p} \right)_{T,A} dp + \left(\frac{\delta \hat{G}}{\delta A} \right)_{p,T} dA. \quad (\text{Gleichung 2.5})$$

Unter der Berücksichtigung einer konstanten Temperatur T und einem konstanten Druck p , was einer isothermen und isobaren Bedingung entspricht, reduziert sich die Gleichung 2.5 zu

$$d\hat{G} = \left(\frac{\delta \hat{G}}{\delta A} \right)_{p,T} dA. \quad (\text{Gleichung 2.6})$$

Die freie Enthalpie $d\hat{G}$ entspricht gleichermaßen der reversiblen Arbeit dW (bei $p, T = \text{const.}$). Die partielle Ableitung ergibt sich somit zu

$$\sigma = \left(\frac{\delta \hat{G}_0}{\delta A} \right)_{p,T} \quad \text{bzw.} \quad d\hat{G} = dW = \sigma \cdot dA, \quad (\text{Gleichung 2.7})$$

wobei die differenzielle Änderung der freien Oberflächen- oder Grenzflächenenthalpie $\delta \hat{G}_0$ ist. Wie bereits erwähnt, ist die Grenz- bzw. Oberflächenspannung σ der flächenspezifische Energieerhalt einer Grenz- bzw. Oberfläche. Damit ist diese identisch mit dem Betrag der Arbeit ΔW , die zur Flächenvergrößerung um eine Flächeneinheit ($1m^2$ bzw. $1cm^2$) aufgewendet werden muss.

$$\Delta W = \Delta \hat{G} = \sigma \cdot \Delta A \quad (\text{Gleichung 2.8})$$

In SI-Einheiten entspricht die Oberflächenspannung σ :

$$[\sigma] = 1 \frac{J}{m^2} = 1 \frac{N}{m} = 1 \frac{kg}{s^2}. \quad (\text{Gleichung 2.9})$$

Die Oberflächenspannung ist nicht zu verwechseln mit der Zugspannung, wie sie bei unter Zug belasteten Bauteilen vorkommt und die Einheit $N \cdot m^{-2}$ hat. Die Oberflächenspannung eines Tropfens nimmt mit steigender Temperatur ab und ist somit am Gefrierpunkt am Größten [BOH02], [MEI03], [MOC04].

2.3.3 Kapillardruck nach YOUNG-LAPLACE

Liegt ein Flüssigkeitstropfen auf einer festen Oberfläche auf und befindet sich im Gleichgewichtszustand, so existiert zwischen Tropfeninnerem und der Gasatmosphäre eine Druckdifferenz. Diese Druckdifferenz Δp_k und der vorherrschende Außendruck p_a sind gleich dem Innendruck p_i des Tropfens. Die Druckdifferenz Δp_k resultiert aus der Kompression durch die Oberflächenspannung und kann mit der YOUNG-LAPLACE-Gleichung beschrieben werden. Für einen kleinen Bereich der Oberfläche wird dies wie folgt betrachtet (s. Abb. 2.16) [BOH02], [MEI03], [MOC04].

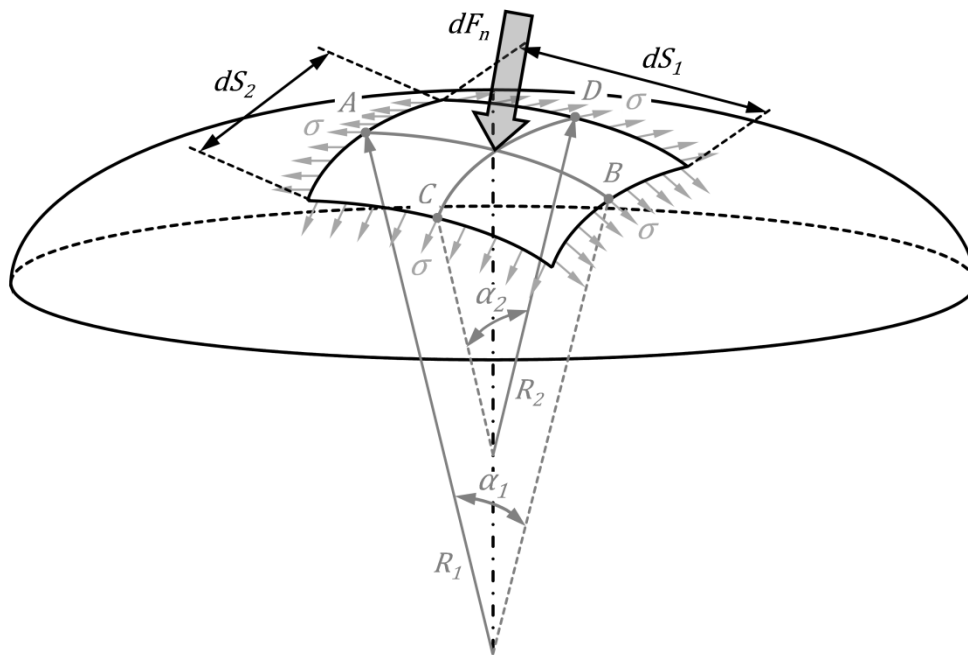


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung eines Oberflächenelements einer gekrümmten Oberfläche eines Tropfens zur Ableitung des Kapillardrucks Δp_k .

Bei gekrümmten Oberflächen tritt senkrecht zur Oberfläche eine wirkende Normalkraft F_n auf, die einen Grenzflächendruck zur Folge hat. Dieser Grenzflächendruck wird auch Kapillardruck genannt. Die Radien R_1 und R_2 beschreiben in Abbildung 2.16 ein gekrümmtes Oberflächenelement $d\tilde{A}$. Dieses Oberflächenelement ergibt sich aus der Multiplikation der Strecken dS_1 und dS_2 . Daraus ergibt sich durch den Kapillardruck Δp_k und der Oberflächenspannung σ folgender Gleichgewichtsansatz [BOH02], [MOC04], [POP09], [SPU07]:

$$dF_n = \Delta p_k \cdot d\tilde{A} = \Delta p_k \cdot dS_1 \cdot dS_2 = \sigma \cdot dV \quad \text{bzw.}$$

$$dF_n = \sigma \cdot dS_2 \cdot \alpha_1 + \sigma \cdot dS_1 \cdot \alpha_2 . \quad (\text{Gleichung 2.10})$$

Die Krümmungswinkel α_1 und α_2 lassen sich für ein Oberflächenelement wie folgt beschreiben:

$$\alpha_1 = \frac{dS_1}{R_1} \quad \text{und} \quad \alpha_2 = \frac{dS_2}{R_2} . \quad (\text{Gleichung 2.11})$$

Daraus ergibt sich:

$$\Delta p_k \cdot dS_1 \cdot dS_2 = \sigma \cdot dS_2 \cdot \frac{dS_1}{R_1} + \sigma \cdot dS_1 \cdot \frac{dS_2}{R_2} , \quad (\text{Gleichung 2.12})$$

was wiederum zu folgender Form des Kapillardrucks Δp_k führt:

$$\Delta p_k = \sigma \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) . \quad (\text{Gleichung 2.13})$$

Die Formel für einen idealen kugelförmigen Tropfen reduziert sich somit zu:

$$\Delta p_k = \frac{\sigma \cdot 2}{R} . \quad (\text{Gleichung 2.14})$$

In SI-Einheiten entspricht der Kapillardruck:

$$[\Delta p_k] = 1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa} = 100 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 100 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} . \quad (\text{Gleichung 2.15})$$

Ist die Geometrie eines Tropfens bekannt, kann der Kapillardruck berechnet werden. Mit der Hilfe des Kapillardrucks und dem bekannten Volumen V , sowie der bekannten Kontaktfläche eines Tropfens kann mit der YOUNG-LAPLACE-Gleichung der Gleichgewichtszustand der Tropfenoberfläche ermittelt werden [BOH02], [MEI03], [MOC04], [POP09], [SPU07].

2.3.4 Kontaktwinkel und Benetzung

Die Charakterisierung einer festen Oberfläche bezüglich ihrer Grenzflächenspannung und des Verhaltens der Benetzung der darauf befindlichen Flüssigkeit erfolgt über die Methode der Kontaktwinkelmessung nach YOUNG. Ein Flüssigkeitstropfen bildet an seiner Randlinie einen Kontaktwinkel θ (engl. contact angle) zum Festkörper aus. Dieser Kontaktwinkel hängt vom Gleichgewicht der thermodynamischen Eigenschaften des Systems ab. Auch wird der Kontaktwinkel als Benetzungswinkel und Randwinkel bezeichnet. In der Randlinie des Tropfens treffen drei Oberflächen aufeinander, die unterschiedliche Oberflächenspannungen aufweisen. Abbildung 2.17 veranschaulicht dies [BOH02], [CIA06], [MIS07], [POP09], [ZIM10].

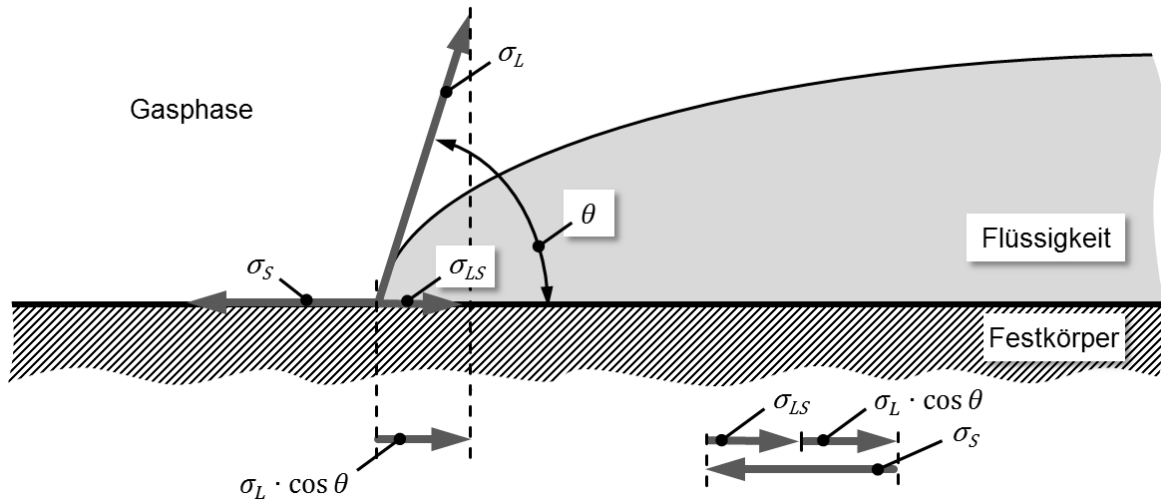


Abbildung 2.17: Kontaktwinkel eines Tropfens auf einer Festkörperoberfläche.

Die Oberflächenspannung der Flüssigkeit wird hier mit σ_L bezeichnet (L steht für das engl. Liquid) und wirkt zwischen Gas und Flüssigkeitsphase. Zwischen der Gasphase und dem Festkörper wirkt die Oberflächenspannung σ_S (S steht für das engl. Surface). Die Grenzflächenpannung zwischen Flüssigkeit und Festkörper wird als σ_{LS} definiert. Der Gleichgewichtszustand der wirkenden Kräfte stellt sich wie folgt dar [MEI03], [MOC04]:

$$\sigma_S = \sigma_{LS} + \sigma_L \cdot \cos \theta \quad . \quad (\text{Gleichung 2.16})$$

Aufgelöst auf den Kontaktwinkel ergibt sich die Gleichung zu:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_S - \sigma_{LS}}{\sigma_L} \quad . \quad (\text{Gleichung 2.17})$$

Der sich bildende Kontaktwinkel ist somit ein Maß für die Benetzbarkeit einer Flüssigkeit auf einer Festkörperoberfläche. Die Grenzflächenpannung σ_{LS} ist jedoch bei Polymeroberflächen (wie z. B. dem Klischee) nur teilweise rechnerisch durch halbempirische Gleichungen abschätzbar. Deshalb wurde die Größe Benetzungsspannung σ^B eingeführt [BOH02], [BRÖ97], [DÖR02], [JUN92], [MEI03], [MOC04], [POP09], [CIA06], [ZIM10]:

$$\sigma^B = \sigma_S - \sigma_{LS} = \sigma_L \cdot \cos \theta \quad . \quad (\text{Gleichung 2.18})$$

Mit der Benetzungsspannung kann die Differenz der Oberflächenspannung zur Grenzflächenpannung durch die Kontaktwinkelmessung quantitativ bestimmt werden. Eine vollständige Benetzbarkeit wird erreicht, wenn folgende Bedingung erfüllt ist [DÖR02], [POP09]:

$$\sigma^B = \sigma_L = \sigma_S - \sigma_{LS} \quad . \quad (\text{Gleichung 2.19})$$

Flüssigkeiten besitzen einen „polaren“ und einen „dispersen“ Anteil, der sich auf die Oberflächenspannungen und auf die Wechselwirkung mit dem Festkörper auswirkt. Ein polarer Anteil der Oberflächenspannung kann auf Dipol-Dipol-Wechselwirkungen und Wasserstoffbrückenbindungen zurückgeführt werden [MEI03]. Bei einem dispersen Anteil spricht man von VAN-DER-WAALS-Wechselwirkungen. Zur Bestimmung des polaren und dispersen Anteils in einer Flüssigkeit gibt es die Methoden nach OWENS, WENDT, RABEL und KAEBLE (OWRK), die häufig bei Polymeroberflächen angewandt wird. Hierzu wird der fortschreitende Kontaktwinkel einer Flüssigkeit aus polarem und dispersem Anteil auf der Festkörperoberfläche gemessen. Die Oberflächenspannungen werden wie folgt als geometrisches Mittel aus polarem σ_i^p und dispersem σ_i^d Anteil definiert [HER02], [KLA11], [MEI03], [MOC04], [NOL10]:

$$\sigma_S = \sigma_S^p + \sigma_S^d \quad \text{und} \quad \sigma_L = \sigma_L^p + \sigma_L^d . \quad (\text{Gleichung 2.20})$$

Für die Grenzflächenspannung σ_{LS} ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\sigma_{LS} = \sigma_S + \sigma_L - 2 \cdot \left(\sqrt{\sigma_S^p \cdot \sigma_L^p} + \sqrt{\sigma_S^d \cdot \sigma_L^d} \right) . \quad (\text{Gleichung 2.21})$$

Eliminiert man mit der Young'schen Gleichung die Oberflächenspannung des Festkörpers σ_S so führt das zu [MEI03]

$$\sigma_L \cdot (\cos \theta + 1) = 2 \cdot \left(\sqrt{\sigma_S^p \cdot \sigma_L^p} + \sqrt{\sigma_S^d \cdot \sigma_L^d} \right) . \quad (\text{Gleichung 2.22})$$

Für eine grafische Auswertung multipliziert man die Gleichung mit [MEI03]

$$\left(2 \cdot \sqrt{\sigma_L^d} \right)^{-1} ,$$

wodurch man folgende Geradengleichung $y = a \cdot x + b$ mit

$$y = \frac{\sigma_L \cdot (\cos \theta + 1)}{2 \cdot \sqrt{\sigma_L^d}} , \quad (\text{Gleichung 2.23})$$

$$a = \sqrt{\sigma_S^p} , \quad (\text{Gleichung 2.24})$$

$$x = \sqrt{\frac{\sigma_L^p}{\sigma_L^d}} , \quad (\text{Gleichung 2.25})$$

$$b = \sqrt{\sigma_S^d} , \quad (\text{Gleichung 2.26})$$

erhält:

$$\frac{\sigma_L \cdot (\cos \theta + 1)}{2 \cdot \sqrt{\sigma_L^d}} = \sqrt{\sigma_S^p} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_L^p}{\sigma_L^d}} + \sqrt{\sigma_S^d} . \quad (\text{Gleichung 2.27})$$

Aus der Steigung der Geraden kann der polare Anteil und aus dem Achsenabschnitt der disperse Anteil der Oberflächenspannung des Festkörpers abgelesen werden [MEI03], [MOC04].

Ob eine Flüssigkeit den Festkörper benetzt, hängt von den drei Oberflächenenergien an der Dreiphasenkontaktlinie (DPKL) ab. Allerdings hat man festgestellt, dass die Benetzung grundsätzlich vom Verhältnis von σ_S zu σ_L abhängt [MOC04]. Geht man davon aus, dass nur ein disperser Anteil zwischen den Oberflächen vorliegt, also nur VAN-DER-WAALS-Kräfte wirken, kann die Grenzflächenspannung folgendermaßen formuliert werden [MOC04], [POP09]:

$$\sigma_{LS} \approx \sigma_S + \sigma_L - 2 \cdot \sqrt{\sigma_S \cdot \sigma_L} . \quad (\text{Gleichung 2.28})$$

Erweitert wird die Formel aus dem Kräftegleichgewicht der DPKL (s. Abb. 2.17) zu:

$$\sigma_S = \sigma_S + \sigma_L - 2 \cdot \sqrt{\sigma_S \cdot \sigma_L} + \sigma_L \cdot \cos \theta . \quad (\text{Gleichung 2.29})$$

Aufgelöst auf den Kontaktwinkel ergibt sich [POP09]:

$$\cos \theta = 2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_S}{\sigma_L}} - 1 . \quad (\text{Gleichung 2.30})$$

Abhängig von der Benetzung der Flüssigkeit ändert sich deren Kontaktwinkel. Die verschiedenen Benetzungszustände in Abhängigkeit des Kontaktwinkels sind in Abbildung 2.18 dargestellt [MEI03], [ZIM10]:

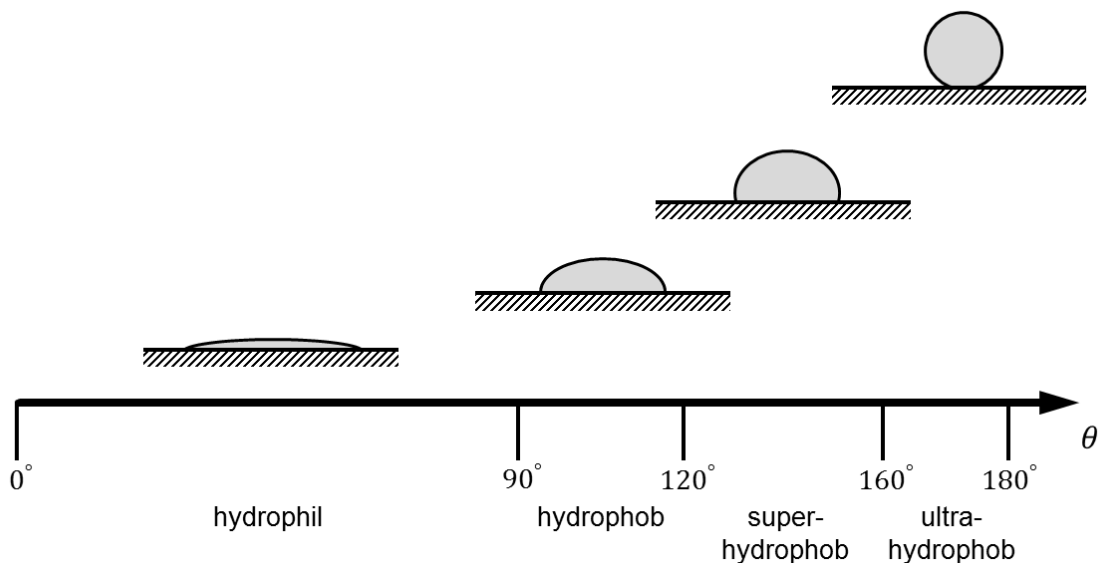


Abbildung 2.18: Benetzungszustände in Abhängigkeit des Kontaktwinkels θ [MEI03], [ZIM10].

Bei der Benetzung der Oberfläche eines Festkörpers liegt entweder eine „totale“ bzw. „vollständige“ oder eine „partielle“ Benetzung vor. Den Begriff „totale“ Benetzung oder verwendet man, wenn eine Flüssigkeit die Oberfläche vollständig benetzt und der Kontaktwinkel zu null wird. Die Adhäsionskräfte dominieren hier im Vergleich zu den Kohäsionskräften. Dies bedeutet, dass die Grenzflächenspannung zwischen Festkörper und Gas größer ist als die Grenzflächenspannung zwischen Festkörper und Flüssigkeit. Bei der „partiellen“ Benetzung überwiegen die Kohäsionskräfte und es bildet sich eine Tropfenform aus [MEI03], [ZIM10].

Bei strukturierten Festkörperoberflächen wird häufig angenommen, dass sich gegenüber glatten Oberflächen ein größerer Kontaktwinkel ausbildet, $\theta_{\text{rauhe Oberfl.}} > \theta_{\text{glatte Oberfl.}}$ und sich eher ein hydrophobes Verhalten einstellt (s. Lotus-Effekt) [POP09]. Dies stimmt jedoch nur bedingt, da auf rauen Oberflächen auch ein hydrophiles Verhalten möglich ist. Abhängig von der Art der Strukturierung und der chemischen Homogenität einer Oberfläche kann sich ein unterschiedliches Benetzungsverhalten einstellen (s. Abb. 2.19) [MEI03], [MOC04], [HAB09], [POP09].

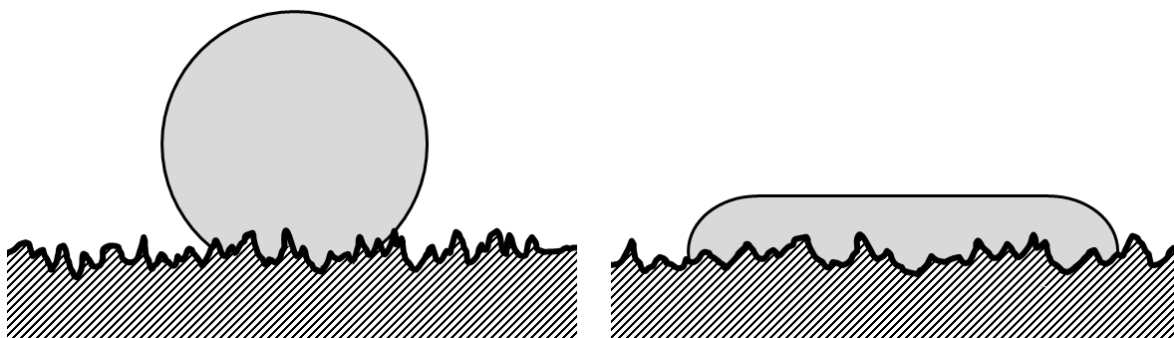


Abbildung 2.19: Benetzungsverhalten auf unterschiedlich strukturierten Oberflächen.

Die Gleichung von YOUNG gilt nur für homogene glatte Oberflächen. Diese sind nicht real, da abhängig von der Größendimension der Oberfläche immer eine Rauheit vorliegt. Bei Oberflächen, bei denen sich die Rauheit im Bereich von 1 bis 5 μm bewegt und somit über der molekularen Rauheit liegt, spricht man von dem WENZEL-Bereich [WEN36]. Dabei dringt die benetzende Flüssigkeit nach dem Modell von WENZEL in die Vertiefungen der Oberflächenrauheit ein und verdrängt die vorliegende Luft (s. Abb. 2.20) [DAL11], [KLA11], [MAR03], [OKU08], [POP09], [WEN36], [WHY08], [ZIM10].

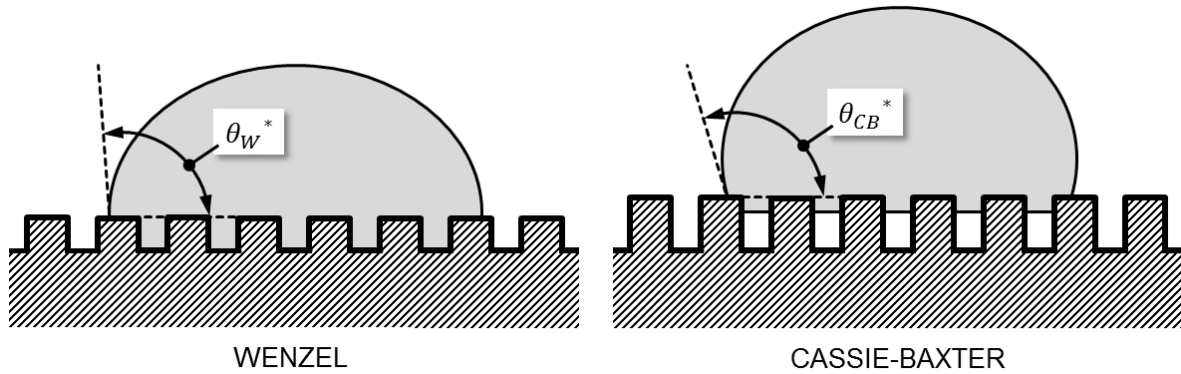


Abbildung 2.20: Benetzungsmodelle und Kontaktwinkel nach WENZEL [WEN36] und CASSIE-BAXTER [CAS44].

Nach WENZEL besitzt die Oberfläche einen Rauheitsfaktor r_W , der wie folgt definiert wird [DAL11], [ZIM10]:

$$r_W = \frac{A_t}{A_p} = \frac{\text{tatsächliche Oberfläche}}{\text{projizierte Oberfläche}} \geq 1 . \quad (\text{Gleichung 2.31})$$

Bei ideal glatten Oberflächen ist $r_W = 1$ und für raue Oberflächen $r_W > 1$. Bei Anwendung des Rauheitsfaktors erweitert sich die YOUNG-Gleichung zu [DAL11], [SCH11], [WEN36], [ZIM10]

$$\cos \theta_W^* = r_W \cdot \cos \theta = r_W \cdot \frac{(\sigma_S - \sigma_{LS})}{\sigma_L} . \quad (\text{Gleichung 2.32})$$

Ein anderes Modell wird von CASSIE-BAXTER [CAS44] beschrieben. Dabei wird angenommen, dass beim hydrophoben Zustand der Tropfen auf den Spitzen der Oberflächenstrukturierung aufliegt und sich somit Luftpolster in den Kavitäten befinden (s. Abb. 2.20). Hierzu wird die Bedingung der Flächenanteile definiert:

$$f_1 + f_2 = 1 . \quad (\text{Gleichung 2.33})$$

Dabei ist f_1 der Flächenanteil des benetzten Festkörpers und f_2 der Anteil der Luftfläche in den Kavitäten, die in Summe immer eins ergeben. Es wird unterschieden zwischen dem Kontaktwinkel θ_1 und Kontaktwinkel θ_2 . Bei dem Kontaktwinkel θ_1 liegt die Dreiphasenkontaktlinie (DPKL) auf den Spitzen des Festkörpers und beim Kontaktwinkel θ_2 in den Kavitäten. Die Gleichung nach CASSIE-BAXTER stellt sich mit den Flächenanteilen f_1 und f_2 wie folgt dar [CAS44]:

$$\cos \theta_{CB}^* = f_1 \cdot \cos \theta_1 + f_2 \cdot \cos \theta_2 . \quad (\text{Gleichung 2.34})$$

Auch mit dem Ansatz von CASSIE-BAXTER kann das Verhalten einer strukturierten Oberfläche nicht ausreichend beschrieben werden. Weitere Theorien zu Benetzungsphänomenen, dem Übergang von strukturierten Oberflächen und der

Kontaktwinkelhysterese werden aktuell in der Forschung weiter untersucht. Hierauf wird in dieser Arbeit nicht tiefer eingegangen [DAL11], [JUN92], [KLA11], [MAN13], [SCH11], [SPO10], [MOG10], [WEN36], [ZIM10].

Im Gleichgewichtszustand in der Dreiphasenkontaktlinie (DPKL) wurde bisher angenommen, dass keine weiteren Kräfte auf das System wirken. Allerdings können bei strukturierten Oberflächen als auch bei der Bewegung der Dreiphasenkontaktlinie (DPKL) auf der Oberfläche (bzw. dyn. Kontaktwinkel bei Kontaktwinkelhysterese) Spannungen f_r aufgrund dynamischer Reibungskräfte auftreten. Die Reibungskraft ist z. B. dafür verantwortlich, dass ein Tropfen auf einer schrägen Oberfläche hängen bleibt. Die Gleichgewichtsbedingung ändert sich wie folgt zu [POP09]

$$\sigma_s = \sigma_{LS} + \sigma_L \cdot \cos \theta \pm f_r . \quad (\text{Gleichung 2.35})$$

Der dynamische Kontaktwinkel bzw. die Kontaktwinkelhysterese beschreibt den Verlauf des Kontaktwinkels an realen rauen Oberflächen bei Bewegung der Dreiphasenkontaktlinie (DPKL) bei zunehmendem und abnehmendem Tropfenvolumen. Die Zu- und Abnahme des Tropfenvolumens wird durch eine Nadel realisiert. Zur Verdeutlichung dient folgende Abbildung 2.21 [KLA11], [ZIM10]:

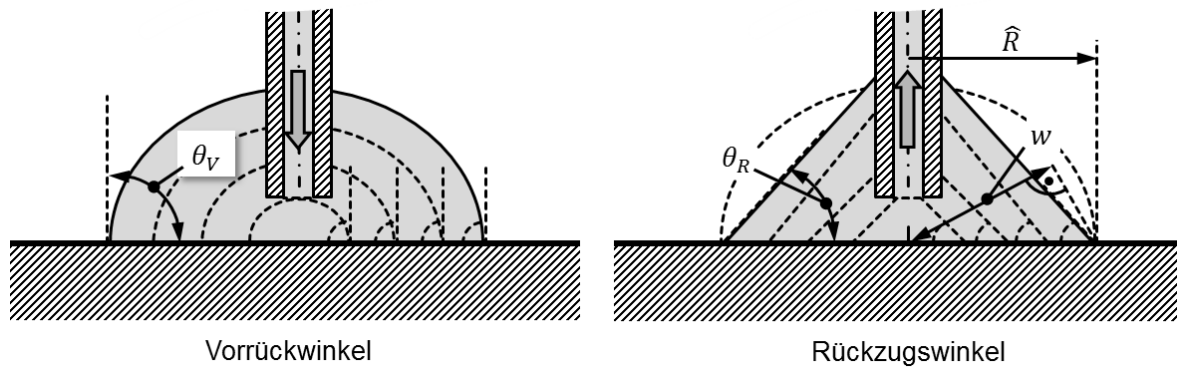


Abbildung 2.21: Vorrück- und Rückzugswinkel eines Tropfens bei Volumen Zu- und Abnahme.

Bei wachsendem Tropfen erhält man den Vorrückwinkel θ_V , der auch häufig Fortschreitewinkel (engl. advancing contact angle) genannt wird. Verringert man das Tropfenvolumen erhält man den Rückzugswinkel θ_R (engl. receding contact angle). Die Differenz $\Delta\theta_{VR}$ (GL. 2.36) dieser beiden Kontaktwinkel wird Hysterese genannt [DAL11], [DÖR02], [JUN92], [KLA11], [SCH11], [SPO10], [ZIM10]:

$$\Delta\theta_{VR} = \theta_V - \theta_R \quad \text{bzw.} \quad \Delta\cos \theta_{VR} = \cos \theta_V - \cos \theta_R . \quad (\text{Gleichung 2.36})$$

Die Bewegungskraft F_{bew} , die benötigt wird, um die Dreiphasenkontaktlinie (DPKL) zu bewegen, ist von der Benetzungsenergie des vorrückenden und der frei werdenden Energie des zurückziehenden Tropfens abhängig. Die Bewegungsgleichung ergibt sich vereinfacht zu [KRU10], [PEN11], [ZIM10]:

$$F_{bew} = \sigma_S \cdot w \cdot \Delta \cos \theta_{VR} , \quad (\text{Gleichung 2.37})$$

wobei w zweimal die tangentielle Strecke der Tropfenoberfläche der gemittelten Winkel θ_R und θ_V darstellt (s. Abb. 2.21). Diese wird durch Gleichung 2.38 beschrieben:

$$w = 2 \cdot \hat{R} \cdot \sin \left(\frac{\theta_R + \theta_V}{2} \right) . \quad (\text{Gleichung 2.38})$$

Hierdurch erweitert sich die Gleichung (2.37) zu (2.39) [PEN11], [ZIM10]

$$F_{bew} = \sigma_S \cdot 2 \cdot \hat{R} \cdot \sin \left(\frac{\theta_R + \theta_V}{2} \right) \cdot (\cos \theta_R - \cos \theta_V) . \quad (\text{Gleichung 2.39})$$

Eine weitere wichtige Größe ist die Kapillarlänge (engl. capillary length) λ_c . Ist die charakteristische Länge eines Tropfens kleiner der Kapillarlänge auf einer Festkörperoberfläche, so hat die Schwerkraft keinen Einfluss mehr auf die Gestalt des Tropfens [BAT67]:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\sigma_L}{\rho \cdot g}} . \quad (\text{Gleichung 2.40})$$

2.3.5 Kapillarität und Kapillarkraft

Kapillarität ist der Einfluss von Oberflächen- bzw. Grenzflächenkräften auf eine Flüssigkeit in engen Spalten, wodurch sich eine makroskopische Bewegung vollzieht, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wird. Dies geschieht bei Flüssigkeit zwischen zwei Platten mit sehr geringem Abstand durch eine Druckdifferenz zwischen Flüssigphase und Gasphase. Diese wird auch als Kapillarbrücke bezeichnet. Betrachtet man eine Flüssigkeitsmenge zwischen zwei Oberflächen aus dem gleichen Material (s. Abb. 2.22), so bildet die Flüssigkeit im Gleichgewichtszustand einen charakteristischen Kontaktwinkel und die Krümmungsradien R_a und R_b aus. Bei einer Entnetzung liegt der Radius R_b mit einem positiven Vorzeichen vor. Bei einem Kontaktwinkel kleiner 90° ist R_b negativ und die Flüssigkeit benetzt [NGU04], [POP09].

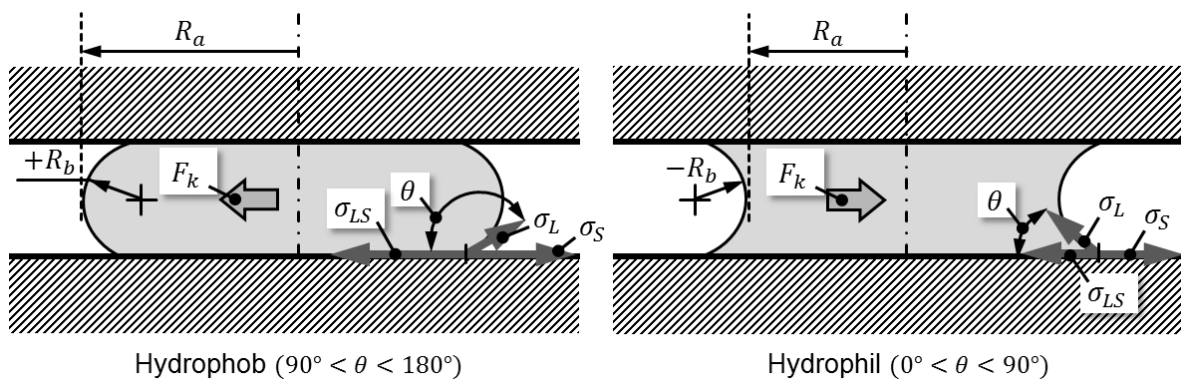


Abbildung 2.22: Kapillarbrücke einer Flüssigkeit zwischen zwei Oberflächen aus gleichem Material.

Unter Anwendung der Gleichung (2.13) ergibt sich die Druckdifferenz des Kapillardrucks Δp_k mit den Radien R_a und R_b zu:

$$\Delta p_k = \sigma_L \cdot \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} \right) . \quad (\text{Gleichung 2.41})$$

Je nachdem ob R_b positiv oder negativ ist, herrscht ein Druck oder Unterdruck in der Flüssigkeit. Der vorliegende Druckzustand ist abhängig von der Größe der Oberfläche A , die sich zwischen der Flüssigkeit und der Gasphase bildet und einer Kraft ausübt, die sogenannte Kapillarkraft F_k . Die Gleichung (2.41) ergibt sich somit zu [NGU04], [POP09]

$$F_k = A \cdot \sigma_L \cdot \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} \right) . \quad (\text{Gleichung 2.42})$$

Unter Annahme der Bedingung $|R_a| \gg |R_b|$ ergibt sich F_k zu

$$F_k \approx A \cdot \sigma_L \cdot \left(\frac{1}{R_b} \right) . \quad (\text{Gleichung 2.43})$$

Neben der Oberflächenspannung gibt es noch die Viskosität als wichtige Größe von Flüssigkeiten.

2.4 Grundlagen der Rheologie

Im folgenden Kapitel wird auf jene theoretischen Grundlagen der Rheologie eingegangen, die für diese Arbeit relevant sind. Hierzu gehören die Viskosität, die Scherrate, das Fließverhalten von Flüssigkeiten, ihre Bestimmung und eine Einführung in die Dehnrheologie.

2.4.1 Viskosität und Scherrate

Viskosität ist nach DIN 1342 die Zähigkeit bzw. der Fließwiderstand eines Fluides gegen das Fließen. Grundsätzlich werden sowohl Gase als auch Flüssigkeiten als Fluide bezeichnet. Die Viskosität wird unterschieden in Scherviskosität η (auch dynamische Viskosität genannt) und in die kinematische Viskosität ν . Eine idealviskose Flüssigkeit (Newton'sches Fluid) bildet zwischen zwei sich entgegengesetzt bewegenden Platten eine laminare Strömung aus (s. Abb. 2.23).

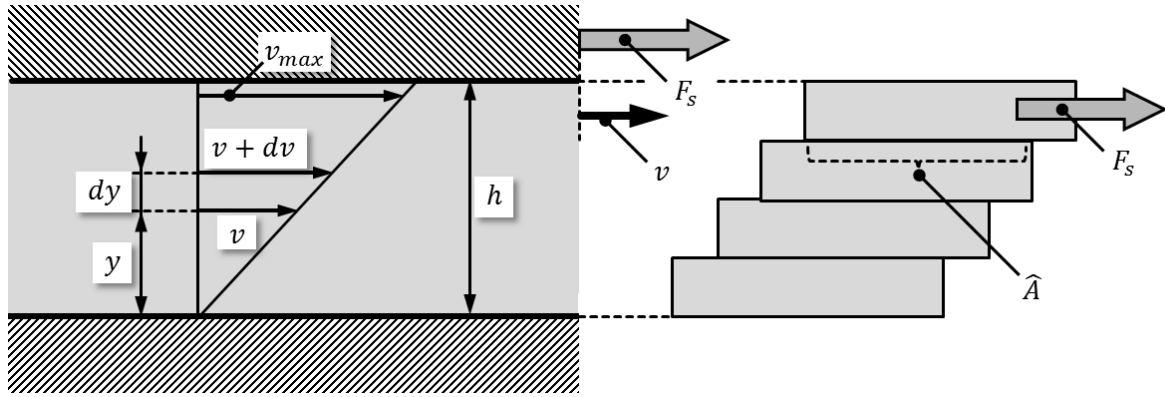


Abbildung 2.23: Laminare Schichtströmung einer Flüssigkeit zwischen zwei Platten und das Verhalten von Flüssigkeitsebenen zueinander unter einer angreifenden Kraft.

Dabei wird angenommen, dass die Flüssigkeitseigenschaften temperatur- und druckunabhängig sind. An der bewegten Platte ist die Fließgeschwindigkeit $v = v_{max}$ und an der stehenden Platte ist $v = 0$. Der Gradient der Schergeschwindigkeit (Scherrate) $\dot{\gamma}$ mit Änderung der Fließgeschwindigkeit und Abstand zur stationären Platte nennt man Scherrate $\dot{\gamma}$ (Gl. 2.45) [ARN11], [BIR87_a], [CHH10], [MEI03], [MEZ06], [NEU09], [SIG12], [WEL00]

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} . \quad [\dot{\gamma}] = 1 \text{ s}^{-1} \quad (\text{Gleichung 2.45})$$

Zwischen den beweglichen Flüssigkeitsschichten wirkt eine Scherkraft F_s auf die Scherfläche \hat{A} . Daraus ergibt sich die Schubspannung τ_{xy} (Gl. 2.46) [BER06], [MEI03]

$$\tau_{xy} = \frac{F_s}{\hat{A}} \quad [\tau_{xy}] = 1 \text{ Pa} . \quad (\text{Gleichung 2.46})$$

Die Strömungsgeschwindigkeit v ist hierbei in x -Richtung gerichtet und deren Gradienten zeigen in y -Richtung. Nach NEWTON ist die Scherrate der Schubspannung proportional:

$$\frac{F_s}{\hat{A}} = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad ; \quad \tau_{xy} = \eta \cdot \dot{\gamma} . \quad (\text{Gleichung 2.47})$$

Die Scherviskosität η ergibt sich dann zu [MEI03]

$$\eta = \frac{\tau_{xy}}{\dot{\gamma}} \quad [\eta] = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} . \quad (\text{Gleichung 2.48})$$

Die dynamische Viskosität η wird bei Newton'schen Flüssigkeiten als Konstante angesehen. Das Verhältnis aus dynamischer Viskosität und der Dichte der Flüssigkeit ρ definiert sich zur kinematischen Viskosität ν (Gl. 2.49) [MEI03]:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\nu] = 1 \frac{\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^3}{\text{kg}} = 1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} . \quad (\text{Gleichung 2.49})$$

Bei Newton'schen oder inkompressiblen Flüssigkeiten, die ein „einfaches“ bzw. „normales“ Fließverhalten aufweisen, gilt ein linearer Zusammenhang, der auch durch die Gleichung des Extraspannungstensors $\boldsymbol{\tau}$ definiert werden kann [BER06]:

$$\boldsymbol{\tau} = 2 \cdot \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [\boldsymbol{\tau}] = 1 \text{ Pa} . \quad (\text{Gleichung 2.50})$$

Der Extraspannungstensor besteht aus Normalspannungen σ_{ii} ($i = x, y, z$) und Tangentialspannungen (Schubspannungen) τ_{ij} ($i \neq j$):

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} . \quad (\text{Gleichung 2.51})$$

Dieser Tensor reduziert sich bei der Bewegung in x -Richtung zur Schubspannung τ_{xy} [BER06]:

$$\tau_{xy} = 2 \cdot \eta \cdot \dot{\gamma}_{xy} \quad [\tau_{xy}] = 1 \text{ Pa} . \quad (\text{Gleichung 2.52})$$

Die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ resultiert aus

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{xy} + \dot{\gamma}_{yx} \quad ; \quad (\dot{\gamma}_{xy} = \dot{\gamma}_{yx}) , \quad (\text{Gleichung 2.53})$$

was zu einer vereinfachten Darstellung der Gleichung 2.52 führt:

$$\dot{\gamma} = 2 \cdot \dot{\gamma}_{xy} \quad \text{bzw.} \quad \dot{\gamma}_{xy} = \frac{\dot{\gamma}}{2} . \quad (\text{Gleichung 2.54})$$

Setzt man die vereinfachte Form der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ in die Gl. (2.51) ein, ergibt sich ebenfalls die Schubspannung τ_{xy} :

$$\tau_{xy} = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [\tau_{xy}] = 1 \text{ Pa} . \quad (\text{Gleichung 2.55})$$

2.4.2 Fließverhalten von Flüssigkeiten

Alle Arten von Flüssigkeiten weisen ein unterschiedliches Fließverhalten auf. Dabei wird grundsätzlich in zwei Gruppen unterschieden. Zum einen in die Newton'schen und zum anderen in die Nicht-Newton'schen Flüssigkeiten. Newton'sche Flüssigkeiten sind z. B. Wasser, Luft, einige Öle und Gase. Die Viskosität von Newton'schen Flüssigkeiten ist unabhängig von der Scherrate. Sie behält bei der Funktion der Schubspannung über der Scherrate in jedem Punkt die gleiche Steigung. Die Scherviskosität als Funktion der Scherrate zeigt einen parallelen Verlauf zur Abszisse (s. Abb. 2.24) [MEI03].

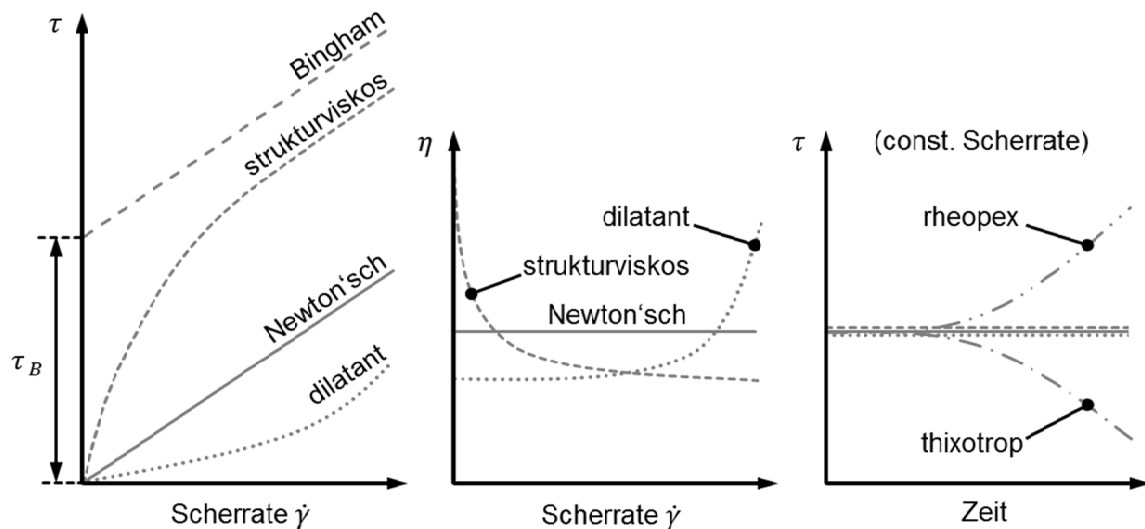


Abbildung 2.24: Fließkurven (links), Viskositätskurven (mittig) und zeitabhängiges Fließverhalten bei konst. Scherrate (rechts).

Anders als Newton'sche Flüssigkeiten verhalten sich scherverdünnende und scherverdickende Flüssigkeiten siehe Abbildung 2.24. Die Schubspannung über der Scherrate ist dann nicht mehr linear abhängig. Die Scherviskosität kann sich über der Scherrate und über der Zeit, bei einer konstanten Scherrate, ändern. Es wird daher unterschieden zwischen zeitabhängigen und zeitunabhängigen Abweichungen zu Newton'schen Flüssigkeiten. Strukturviskose (pseudoplastische) und thixotrope Flüssigkeiten sind nach Definition scherverdünnend. Das viskose Verhalten nimmt mit der Schergeschwindigkeit ab, da sich die darin befindlichen Teilchen in Bewegungsrichtung ausrichten. Entgegengesetzt verhalten sich dilatante und rheopexe bzw. scherverdickende Flüssigkeiten, bei denen die Scherviskosität mit Zunahme der Scherrate ansteigt. Betrachtet man Newton'sche, strukturviskose und dilatante Flüssigkeiten bei einer konstanten Scherrate über der Zeit, so bleibt die Schubspannung konstant. Diese sind daher zeitunabhängig. Thixotrope und rheopexe Flüssigkeiten hingegen ändern ihr Verhalten und sind somit zeitabhängig (vgl. Abb. 2.24) [CHH10], [MEI03], [MEZ06], [SIG12], [WEL00].

Lösungen sind Flüssigkeiten, in denen niedermolekulare Stoffe (wie z. B. Tenside) aber auch Makromoleküle oder Dispersstoffe (Polymere und Feststoffe) durch Lösemittel gelöst sind. Als Lösemittel werden Wasser, organische Lösemittel und organische synthetische Öle verwendet. Lösungen oder Dispersphasensysteme mit gering gelöstem Anteil an Molekülen oder Teilchen werden als Molekulardispersionen bezeichnet und sind in der Regel Newton'sch. Ein scherverdünnendes Fließverhalten zeigen z. B. Suspensionen mit nadel- oder plättchenförmigen Partikeln, agglomerierte Partikel in Dispersionen, Emulsionen und auch einige Lösungen. Eine Suspension ist eine Dispersion, in der feine Teilchen verteilt sind. Diese Teilchen richten sich im Scherzustand aus, wodurch die Viskosität abnimmt. Agglomerierte Partikel in Dispersionen ist der Zusammenschluss bzw.

das Anhaften von Partikeln gleicher Art, die sich jedoch in ihrer Größe unterscheiden können. Unter Scherung zerfallen diese Zusammenschlüsse und die Dispersionsflüssigkeit zwischen den Partikeln fließt wieder. Eine Emulsion hingegen ist das Gemisch zweier nicht lösbarer Flüssigkeiten. Dabei ist die Flüssigkeit in Form von feinen Tröpfchen in einer anderen Flüssigkeit (Dispersionsmedium) verteilt. Im Scherzustand werden die dispergierten Tröpfchen ellipsenförmig verformt, wodurch der Strömungswiderstand zwischen den Tröpfchen reduziert wird. Beispiele für scherverdünnende Flüssigkeiten sind Polymer- und Tensidlösungen, Polymerschmelzen, organische Bindemittel (z. B. Leim u. Kleister) und viele Lackfarben. Lacke und Farben sind häufig mehrphasige Systeme, in denen unterschiedliche kolloidale Systeme vorkommen. Kolloide sind alle Arten von dispersen Systemen. So können z. B. Pigmente und Füllstoffe in Lösemittel oder Wasser dispers vorkommen, als sogenannte Pigmentdispersionen. Polymere- und konzentrierte kolloide Dispersionen zeigen ein nicht-Newton'sches Verhalten. Ab einer gewissen Konzentration an Teilchen ist häufig eine Zunahme der Viskosität zu erkennen. Dann spricht man von Scherverdickung oder Scherdilatanz. Ein Beispiel für solche scherverdickenden Systeme sind konzentrierte Wasserdispersionen mit Stärke oder Sand [BER06], [MEI03], [MEZ06], [SIG12].

2.4.3 Viskoelastizität und Fließgrenze

Bei nicht-Newton'schem Verhalten von Flüssigkeiten in Bewegung tritt eine Normalspannungsdifferenz auf. Bei ruhenden Flüssigkeiten ist die Normalspannung τ_N gleich dem negativen hydrostatischen Druck ($\tau_N = -p_{hs}$ bzw. $\tau = 0$; $\tau_{xy} = 0$; $[\tau_N] = 1 \text{ Pa}$). Flüssigkeiten, die nicht ruhen, können elastische Eigenschaften aufweisen und Extranormalspannungen erzeugen. Die Extranormalspannungen sind alle auftretenden Spannungen aufgrund von Deformationseffekten des Materials. Der Übergang von Newton'schen zu nicht-Newton'schen Flüssigkeiten ist dabei fließend und hängt von der Volumenkonzentration, der kolloidalen Größenordnung, dem Lösemittel und dem Wechselwirkungspotenzial ab. Alle Flüssigkeiten sind immer auch elastisch und weisen somit immer Viskoelastizität auf. Beschrieben wird das viskoelastische Fluid durch die MAXWELL-Gleichung [ARN11], [BER06], [SIG12]:

$$\lambda \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial t} + \tau_{xy} = \eta \cdot \dot{\gamma} . \quad (\text{Gleichung 2.56})$$

Der Extrapannungstensor für das xy -Element wird als τ_{xy} bezeichnet. Die Viskosität (Scherviskosität) ist η , die Scherrate $\dot{\gamma}$ und λ die Maxwell'sche Relaxationszeit. Im stationären Fall ($\partial \tau_{xy} = 0$; $\partial_t = 0$) reduziert sich Gleichung (2.56) auf den

Schubspannungsansatz nach NEWTON $\tau_{xy} = \eta \cdot \dot{\gamma}$. Für sich sehr schnell verändernde Vorgänge ergibt sich der Grenzfall für $|\lambda \partial_t \tau_{xy}| \gg \tau_{xy}$ zu [BER06]:

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial t} = \frac{\eta}{\lambda} \cdot \dot{\gamma} . \quad (\text{Gleichung 2.57})$$

Die Scherrate $\dot{\gamma}$ ist die zeitliche Ableitung der Deformation γ , weshalb die Scherrate als

$$\dot{\gamma} = \partial_y \cdot v_x \quad (\text{Gleichung 2.58})$$

definiert wird und die Änderung der x -Komponenten des Feldes der Strömungsgeschwindigkeit v_x in y -Richtung beschreibt. So ergibt sich die Deformation γ zu [BER06]

$$\gamma = \partial_y \cdot u_x , \quad (\text{Gleichung 2.59})$$

wobei u_x der Verschiebungsvektor ist und $\partial_y \cdot u_x$ die Änderung der x -Komponenten der Verschiebevektoren in y -Richtung formuliert. Berücksichtigt man den Zusammenhang zwischen Scherrate $\dot{\gamma}$ und Deformation γ mit der Verknüpfung $v = \partial_t \cdot u$, so ergibt sich die Gleichung (2.57) zu

$$\tau_{xy} = \frac{\eta}{\lambda} \cdot \gamma = G \cdot \gamma , \quad (\text{Gleichung 2.60})$$

wodurch sich das Schermodul G aus dem Verhältnis von Scherviskosität η und Relaxationszeit λ ergibt:

$$G = \eta \cdot \lambda^{-1} \quad [G] = 1 \text{ Pa} . \quad (\text{Gleichung 2.61})$$

Ruhende konzentrierte Emulsionen und Suspensionen besitzen wie Festkörper eine Elastizität. Bei kleinen Kräften finden hier lineare Deformationen statt. Diese Bingham-Fluide verhalten sich wie eine Newton'sche Flüssigkeit als lineare Funktion der Schubspannung über der Scherrate. Ein Fließen tritt allerdings erst bei einer höheren Belastung auf. Hierzu muss erst eine gewisse Schubspannungsgrenze τ_B erreicht werden, damit es fließt. Diese aufzubringende Schubspannung wird auch Fließgrenze τ_0 genannt. Flüssigkeiten mit einer solchen Fließgrenze werden häufig als „Nicht-Fluide“ bezeichnet. Betrachtet man die Scherviskosität über der Scherrate von Bingham-Fluiden, so zeigt sich ein ähnlicher Verlauf wie bei strukturviskosen Flüssigkeiten (s. Abb. 2.24). Beispiele für solche Stoffsysteme sind Glas, Zahnpasta und Butter [BER06], [MEI03], [MEZ06].

2.4.4 Grundmodelle der Dehnrheometrie

Bei Flüssigkeiten treten in unterschiedlichsten technischen Anwendungsbereichen komplexe Strömungsformen auf. Dabei kann in der Flüssigkeit auch ein nicht zu vernachlässigender Dehnanteil vorliegen. Dieser Dehnanteil kann bei nicht-Newton'schen Fluiden (wie z. B. Dispersionen, Polymerlösungen oder Farben und Lacken) nicht über die Scherrheologie ermittelt werden. Viskoelastische Flüssigkeiten unterscheiden sich unter Dehnbeanspruchung wesentlich von der Beanspruchung unter Scherung. Die vereinfachte Form der Darstellung besteht darin, die Volumenelemente entlang einer Raumachse (z-Richtung) zu dehnen (s. Abb. 2.25) [ARN10], [DIR01], [JÄD05], [MCK02], [ROD05], [SCH08]:

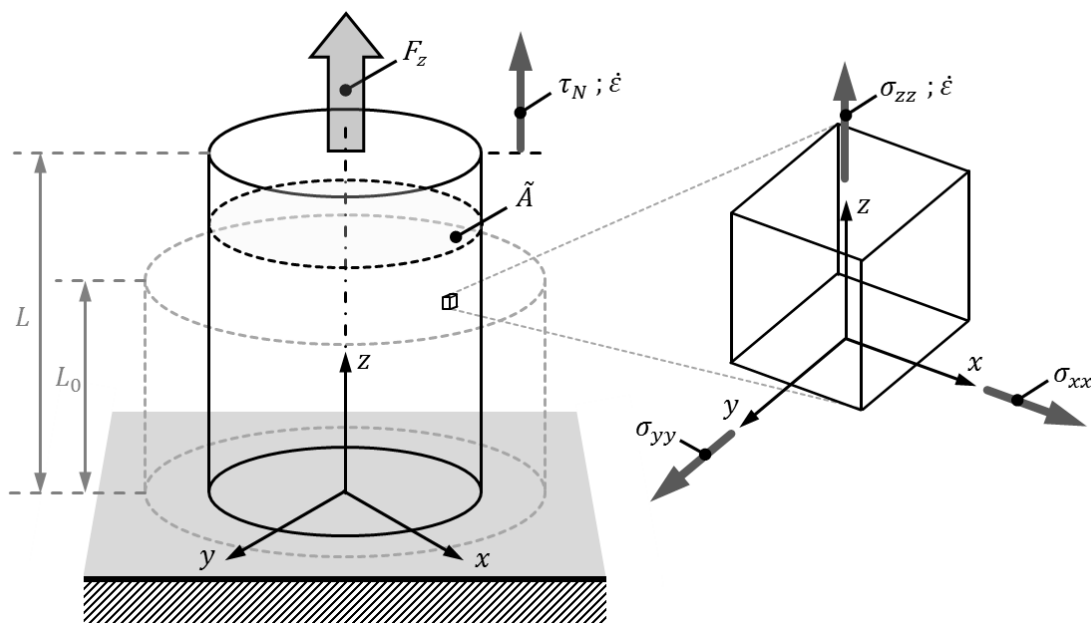


Abbildung 2.25: Vereinfachte Darstellung eines gezogenen Volumenkörpers einer Flüssigkeit (links) und deren Elementausschnitt mit den vorliegenden Spannungen in x-, y-, z-Richtung (rechts).

Deshalb wurden spezielle Methoden entwickelt, um das Dehnverhalten von Flüssigkeiten zu analysieren. Bei diesen Methoden wird grundsätzlich versucht, den Einfluss der Scherung auf das Dehnverhalten stark zu minimieren. Unter der Annahme, dass L_0 die Länge des Volumenkörpers im Ausgangszustand und L die Länge des Volumenkörpers im Endzustand ist, lässt sich die Gesamtdehnung ϵ wie folgt definieren [ARN11], [CHH10], [FOR77], [HEN28], [PAH91], [SCH08]:

$$\epsilon = \epsilon_{zz} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) . \quad (\text{Gleichung 2.62})$$

Diese logarithmische Dehnung wird in der Literatur als HENCKY-Dehnung ϵ bezeichnet. Anders als bei der technischen Dehnung bezieht man sich nicht auf die Längenänderung, sondern auf die aktuelle Gesamtlänge des Körpers. Die technische Dehnung stellt somit eine Reihenentwicklung der logarithmischen Dehnung dar, die nach dem ersten Glied

abgebrochen wird. Aus der Dehnung nach HENCKY ergibt sich die Dehngeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}$ [ARN11], [HEN28], [SCH08]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{dt} = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{dL}{dt} . \quad (\text{Gleichung 2.63})$$

Die Normalspannung τ_N wird durch die Kraft F_z in z-Richtung, die senkrecht auf die Fläche \tilde{A} des Volumenkörpers wirkt, hervorgerufen (s. Abb. 2.25 - links) [ARN11], [PAH91], [PET06]:

$$\tau_N = \frac{F_z}{\tilde{A}} . \quad (\text{Gleichung 2.64})$$

Analog zu Gleichung (2.47) lässt sich die Dehnaviskosität η_E folgendermaßen angeben:

$$\eta_E = \frac{\tau_N}{\dot{\varepsilon}} . \quad (\text{Gleichung 2.65})$$

Unter Berücksichtigung eines Elementausschnitts des Volumenkörpers (s. Abb. 2.25 - rechts) ergibt sich folgende Darstellung (Gl. 2.66) [CHH10], [PET06], [WEL00]:

$$\eta_E = \frac{\sigma_{zz} - \sigma_{xx}}{\dot{\varepsilon}} = \frac{\sigma_{zz} - \sigma_{yy}}{\dot{\varepsilon}} . \quad (\text{Gleichung 2.66})$$

Bei Newton'schen Flüssigkeiten ist die Dehnaviskosität unabhängig von der Dehngeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}$ und gleich dem Dreifachen der Scherviskosität η [GEL11], [TRO06], [WEL00]:

$$\eta_E = 3 \cdot \eta . \quad (\text{Gleichung 2.67})$$

Dieser Zusammenhang wurde durch TROUTON (1906) bei Experimenten mit Mischungen aus Pech und Teer festgestellt. Für inkompressible Materialien (Festkörper und Flüssigkeiten) ist der Elastizitätsmodul E das Dreifache des Schermoduls G [TRO06], [WEL00]:

$$E = 3 \cdot G = \frac{\tau_N}{\varepsilon} = \frac{\sigma_{zz} - \sigma_{xx}}{\varepsilon} . \quad (\text{Gleichung 2.68})$$

Für nicht-Newton'sche Flüssigkeiten ist die Materialcharakterisierung nicht so einfach. Es gibt keine prägnante, allumfassend konstitutive Gleichung, die die Rate der Belastung, Dehnung und der Dehnaviskosität im Verhältnis zur Scherviskosität beschreibt. Es existieren viele konstitutive Modelle, die viel komplizierter als das Newton'sche Modell sind. Nicht-Newton'sche Modelle bzw. Gleichungen enthalten häufig Daten aus Scher- und Dehn-Rheologie um Strömungsverhalten vorherzusagen [TRO06], [WEL00].

Einen Überblick über die dimensionsabhängigen Modelle von nicht-Newton'schen Flüssigkeiten finden sich in der Literatur von BIRD, ARMSTRONG und HASSAGER (1987) [BIR87_a], [BIR87_b].

In den letzten Jahren ist eine Vielzahl an Dehnrheometern entwickelt worden. Die Schwierigkeit dabei ist, dass die Ergebnisse der verschiedenen Methoden stark voneinander abweichen. Einen Überblick hierzu zeigt die Studie von JAMES & WALTERS [JAM94] nach dem Verfahren von ROUND-ROBIN, mit der man mit einer Testflüssigkeit verschiedene Messgeräte miteinander verglich [SRI90], [WEL00].

Wegen der wichtigen Rolle der Dehnaviskosität in polymeren Flüssigkeiten und angesichts der Uneinigkeit bei den Messungen von 1990, hat sich die Dehnrheologie bzw. die Filamentdehnung (engl. filament stretching) im Laufe des letzten Jahrzehnts weiter entwickelt. Heute ist aus ihr eine praktikable Messtechnik entstanden. Zu den modernsten und am häufigsten verwendeten Methoden zählt die des FiSER's (filament stretching extensional rheometer) [ANN01], [MCK99], [ROT02] (s. Abb. 2.26) und das CaBER's (Capillary Breakup Extensional Rheometer) [THE03], [THE09], [TRO07]. Diese werden angewendet, um die Fließeigenschaften von viskosen und niederviskosen Flüssigkeiten (von $0,01 \text{ Pas}$ bis 1000 Pas) im Dehnungszustand zu charakterisieren. Bei beiden Methoden wird Flüssigkeit durch zwei sich separierende Platten gedehnt und die Verjüngung des sich bildenden Filaments bzw. der Flüssigkeitssäule zeitlich erfasst. Hierbei kann aus der exponentiellen Durchmesserabnahme die Relaxationszeit in Dehnung λ_E ermittelt werden.

Bei der Methode des FiSER's (s. Abb. 2.26) werden die Platten mit einer konstanten Dehnrage (exponentielle Separationsgeschwindigkeit) gedehnt und dabei die Zugkraft gemessen.

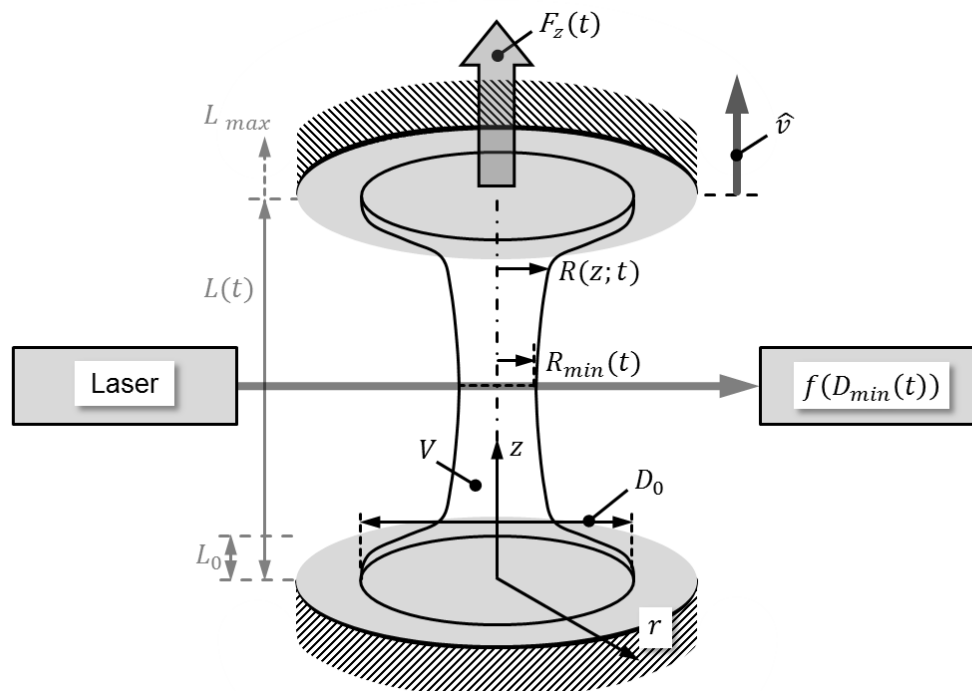


Abbildung 2.26: Schematische Darstellung des Dehnrheometers nach dem Funktionsprinzip des FiSER's (Filament Stretching Extensional Rheometer).

Als Funktion von Dehnrate und Gesamtdehnung kann die Dehnviskosität bestimmt werden. Beim CaBER, auf das im Kapitel 5.1.1 noch genauer eingegangen wird, besteht nicht die Möglichkeit die Dehnrate konstant zu halten. Die hier auftretende Filamentverjüngung wird allein durch das Gleichgewicht zwischen Oberflächenspannung und Kapillarkraft hervorgerufen. Um die Dehnviskosität bestimmen zu können, müssen die Gesamtdehnung und die Dehnrate bestimmt, sowie Annahmen zu dem jeweiligen Stoffgesetz gemacht werden. Der Vorteil der CaBER-Technik ist der niedrige Viskositätsbereich (von $5 \cdot 10^{-2} \text{ Pas}$ bis ca. 10 Pas). Dafür kann man am FiSER die Dehnviskosität direkt bestimmen [ARN11], [SRI91], [TIR93], [TRO07], [WEL00]. Durch den exponentiellen Anstieg der Separationsgeschwindigkeit der Platten wird beim FiSER eine nahezu konstante Verformungsrate im Mittelpunkt des Filaments erreicht, die fast frei von Scherströmung ist. Durch die Messung des verjüngenden Durchmessers des Filaments mittels eines Lasers wird die vorübergehende (transiente) Dehnviskosität η_E^+ abgeleitet. Unter Vernachlässigung der axialen Krümmung in Bewegungsrichtung wird die Dehnviskosität von SZABO folgendermaßen formuliert [ANN01], [MCK97], [ROT02], [SRI91], [SZA97], [TIR93], [WEL00]:

$$\eta_E^+ = \frac{[\tau_{zz} - \tau_{rr}]}{\dot{\epsilon}_0} . \quad (\text{Gleichung 2.69})$$

Die Spannungsdifferenz in der Mitte des Filaments $[\tau_{zz} - \tau_{rr}]$ und die konstant (auferlegte) Dehnrate $\dot{\epsilon}_0$ setzen sich wie folgt zusammen [ANN00], [ANN01], [MCK02]:

$$[\tau_{zz} - \tau_{rr}] = \frac{F_z(t)}{(\pi \cdot R_{min}(t)^2)} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot \hat{v}}{(\pi \cdot R_{min}(t)^2)} - \frac{\sigma}{R_{min}(t)} , \quad (\text{Gleichung 2.70})$$

$$\dot{\epsilon}_0 = -\frac{2}{R_{min}} \cdot \frac{dR_{min}}{dt} . \quad (\text{Gleichung 2.71})$$

Viele Flüssigkeiten von technischer Bedeutung bilden jedoch in diesem Experiment keine stabilen Fäden aus, die resultierenden Kräfte sind zu klein oder es wirken weitere Störeffekte, so dass die Bestimmung der Dehnviskosität nicht möglich ist. Die Störeffekte, die den Arbeitsraum des verwendeten Flüssigkeitsmediums im FiSER eingrenzen, sind Instabilitäten, das Absacken durch Schwerkraft, Kapillarität und/oder Elastizität. Das Auftreten dieser Störeffekte hängt grundsätzlich von den jeweiligen Materialeigenschaften der Flüssigkeit ab [ANN01], [ARN11], [BAC03], [MCK02], [WEL00]. Um zusätzlich noch eine Vergleichsgröße zur Dehnrheometrie zu erhalten, wird häufig die Deborah-Zahl De eingesetzt, um die Zeitabhängigkeit von Flüssigkeiten zu bestimmen. Sie ist eine dimensionslose Kennzahl der Rheologie und beschreibt die Zeitabhängigkeit des viskoelastischen Verhaltens einer Flüssigkeit oder anders ausgedrückt, das Verhältnis von Relaxationszeit t_c zur Beobachtungszeit t_p [MCK99], [REI64], [ROT02]:

$$De = \frac{t_c}{t_p} . \quad (\text{Gleichung 2.72})$$

Die Relaxationszeit einer Flüssigkeit hängt von deren materialspezifischen Eigenschaften ab. Je größer die Deborah-Zahl, desto viskoser die Flüssigkeit [MCK99], [REI64], [ROT02].

Die Untersuchungen der Dehnrheometrie betrachten die Filamentdehnung bei einer stabilen Strömung des Filaments. Der Einfluss der sich separierenden Oberflächen wird auf eine vernachlässigbare Größe reduziert. Bei der Farbspaltung im Druckprozess treten hingegen instabile Strömungen auf. Die Entstehung einer instabilen Strömung wird im folgenden Kapitel behandelt.

2.5 Grundlagen der instabilen Strömung

Im vorliegenden Kapitel wird auf die Grundlagen wie Kapillarzahl und Instabilität eingegangen, die für diese Arbeit relevant sind.

2.5.1 Kapillarzahl

Die Kapillarzahl Ca ist eine dimensionslose Kennzahl und beschreibt den Einfluss der charakteristischen Geschwindigkeit (Benetzungsgeschwindigkeit) u der DPKL aufgrund der Oberflächenspannung der Flüssigkeit σ_L und der dynamischen Viskosität η . Diese setzt sich wie folgt zusammen [BEH93], [DUS74], [HOC76], [JUN92], [SCH72], [TRO07]:

$$Ca = \frac{\eta \cdot u}{\sigma_L} = \frac{v \cdot \rho \cdot u}{\sigma_L} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Oberflächenkraft}} = \frac{We}{Re} . \quad (\text{Gleichung 2.73})$$

Hier sind We die WEBER-Zahl und Re die REYNOLDS-Zahl, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden. Bei quasistatischen Vorgängen bzw. unendlich langsamen Bewegungen wird die Kapillarzahl sehr klein und geht gegen null. Bei hochdynamischen Abläufen überwiegen die rheologischen Eigenschaften gegenüber der Oberflächenspannung der Flüssigkeit. Die Kapillarzahl (engl. capillary number) nimmt dann einen Wert um eins oder höher an. Wenn die Kapillarzahl einer Flüssigkeit größer ist als ihre kritische Kapillarzahl Ca_{krit} und somit die Kräfte durch viskose Effekte die Kapillarkräfte überwinden, entsteht eine elastische Instabilität. Diese Instabilität, wie sie auch bei der Separation von zwei Platten und einer dazwischen befindlichen Flüssigkeit vorkommt, wird als SAFFMAN-TAYLOR-Instabilität bezeichnet.

2.5.2 Finger-Instabilität mit Analogie zu SAFFMAN-TAYLOR

Eine Fluidströmung wird ab einer REYNOLDS-Zahl $Re > Re_{krit} \approx 2320$ instabil und es kommt zu Turbulenz [BOH02]. Die REYNOLDS-Zahl definiert dabei den Übergang von

einer laminaren zu einer instabilen Strömung und beschreibt das Verhältnis von Trägheitskräften zu Reibungskräften. Sie setzt sich wie folgt zusammen:

$$Re = \frac{\rho_{ch} \cdot v_{ch} \cdot d_{ch}}{\eta} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibungskraft}} \quad (\text{Gleichung 2.74})$$

Dabei ist ρ_{ch} die charakteristische Dichte des Fluids, v_{ch} die charakteristische Strömungsgeschwindigkeit des Fluids gegenüber dem Festkörper, d_{ch} die charakteristische Länge des Festkörpers und η die dynamische Viskosität [PUR77]. Bei der Farbspaltungsströmung zwischen zwei sich separierenden Festkörperoberflächen im Anfangszustand spricht man ebenfalls von Instabilität. Im Anfangszustand der Platten wird vermutet, dass eine Instabilität mit einer Analogie zu der SAFFMAN-TAYLOR-Instabilität entsteht. Während die grundsätzliche Betrachtung von SAFFMAN-TAYLOR [SAF58] einen Korvettenversuch beschreibt, tritt bei der Separation von Festkörperoberflächen die sogenannte Finger-Instabilität auf. Diese findet zwischen dem Flüssigkeitsmedium (Farbe) und dem Umgebungsmedium (Luft- bzw. Gasphase) statt und wird auch als Viscous Fingering (VF) oder elastische Finger-Instabilität (engl. Elastic Finger Instability) bezeichnet (s. Abb. 2.27) [BEH93], [MCE66].

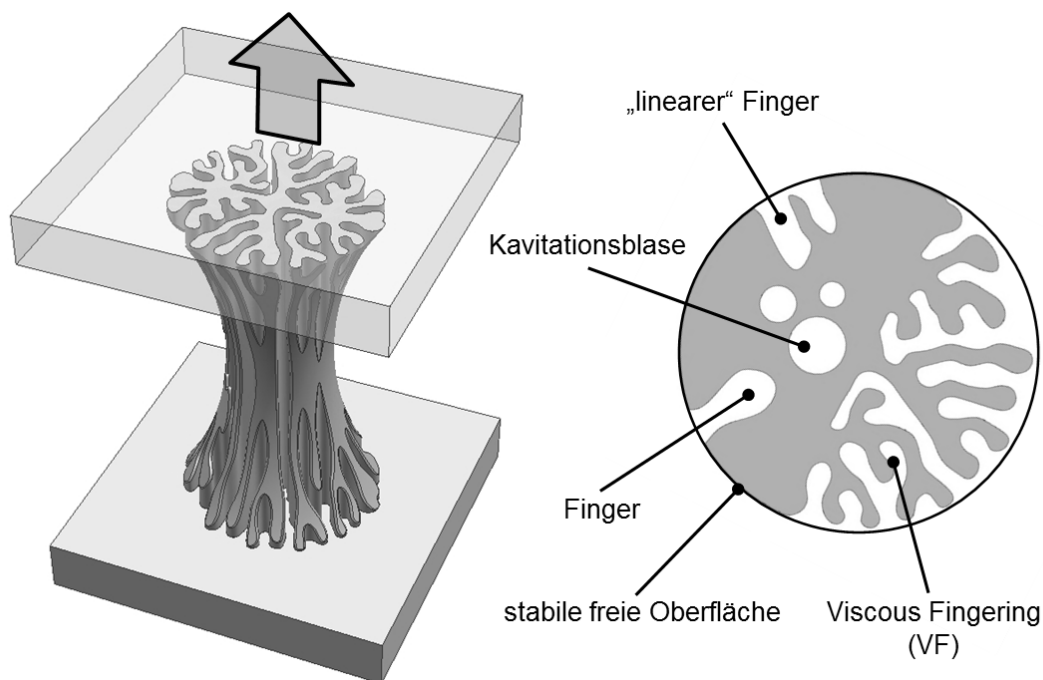


Abbildung 2.27: Schematische Darstellung einer Finger-Instabilität bei der Separation zweier Platten nach den Versuchen von BEHLER [BEH93] mit Viscous Fingering und SPIEGELBERG/MCKINLEY [SPI96] bei Untersuchungen der Filamententstehung.

Die Abbildung 2.27 zeigt die hochdynamische Separation zweier Platten, bei der das dazwischen befindliche Fluid eine Instabilität ausbildet [SAF58], [SCH72], [SPI96], [SPU07]. Dies geschieht durch das radiale Eindringen der Luft in die Flüssigkeit, bei dem sich Fingerstrukturen aufgrund des Viskositätsunterschieds von Flüssigkeit zum Gas und

dem vorherrschenden Unterdruck bilden. Die Oberflächenspannungs-Effekte der Flüssigkeit haben nur einen vernachlässigbaren bzw. sehr geringen Einfluss auf die Entstehung der Finger. Die Fingerstrukturen verzweigen mit fortschreitender Separation immer weiter und erzeugen komplexe Geometrien. Auch können sich Kavitationsblasen bilden, die die Bildung von Fingerstrukturen begünstigen. Sowohl aus den Fingerstrukturen, als auch aus den eventuell auftretenden Kavitationsblasen entstehen bei fortgeschrittener Separation, ein oder mehrere Filamente, die bei einer bestimmten Dehnrate reißen. Viscous Fingering ist die Bildung dieser Fingerstrukturen in einer morphologisch instabilen Grenzfläche, das erstmals durch das Darcy'sche Gesetz mathematisch formuliert wurde und die Strömung durch ein poröses Medium beschreibt. Das Phänomen der Fingerbildung tritt sowohl bei Newton'schen als auch nicht-Newton'schen Flüssigkeiten auf. Diese Strömungsinstabilität ist sehr ähnlich der klassischen SAFFMAN-TAYLOR-Instabilität, wie sie auch in einer HELE-SHAW-Zelle auftritt und erstmals von PATERSON an einer kreisförmigen Zelle durchgeführt wurde [BAC03], [BEH93], [BRA96], [HEL98], [KAE65], [PAT81], [RAS99], [RAS01], [SAF58], [SHE97], [SPI96], [WEL00], [ZOS89].

Die komplexe Wellenlänge der Finger in einer SAFFMAN-TAYLOR-Instabilität ist nicht einfach zu beschreiben, da häufig kein linearer Zusammenhang vorliegt [NAS09].

Der Bildung von Fingerinstabilitäten widmet sich ein umfangreiches Forschungsfeld mit unterschiedlichen Ansätzen, die sich immer wieder als Variante der klassischen SAFFMAN-TAYLOR-Instabilität verstehen. Eine Übersicht hierzu findet sich in der Literatur unter [AMA05], [LIN05], [MCC95], [SHE97].

2.5.3 Weitere dimensionslose Größen

Die folgenden dimensionslosen Größen haben ebenfalls einen Einfluss auf die Farbspaltung und werden hier zur Vollständigkeit der Grundlagen genannt. Die WEBER-Zahl We ist ein Maß für die Tropfenverformung. Sie definiert sich wie folgt:

$$We = \frac{\rho_{ch} \cdot (v_{ch})^2 \cdot d_{ch}}{\sigma_L} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Oberflächenkraft}} \quad (\text{Gleichung 2.75})$$

Dabei ist ρ_{ch} die charakteristische Dichte des Fluids, v_{ch} die charakteristische (relative) Strömungsgeschwindigkeit, d_{ch} die charakteristische Länge und σ_L die Oberflächenspannung der Flüssigkeit. Eine Zusammenführung von der REYNOLDS-Zahl und der WEBER-Zahl ist die OHNESORGE-Zahl Oh , die sich wie folgt darstellt [PET05]:

$$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\rho_{ch} \cdot d_{ch} \cdot \sigma_L}} = \frac{\text{Reibungskraft}}{\sqrt{\text{Trägheitskräfte} \cdot \text{Oberflächenkraft}}} \quad (\text{Gleichung 2.76})$$

2.6 Stand der Forschung – Flüssigkeitsspaltung

In diesem Kapitel werden auf den Stand der Forschung bei der Flüssigkeitsspaltung und auf Arbeiten eingegangen, die thematisch an die vorliegende Arbeit angrenzen. Hierzu werden zunächst die Partialmodelle aus einer Vielzahl an Literatur definiert und in einer Tabelle zusammengetragen. Anschließend wird gezielt auf einzelne Forschungsarbeiten eingegangen, die sich den Partialmodellen widmen. Gleichmaßen wird die Flüssigkeitsspaltung zwischen Walzen betrachtet.

2.6.1 Partialmodelle der parallelen Plattenseparation

Neben den bisher genannten Untersuchungen der Flüssigkeitsspaltung und SAFFMAN-TAYLOR-Instabilität wurde für diese Arbeit auch weitergehende Literatur gesichtet, die sich grundsätzlich mit der Flüssigkeitsspaltung beschäftigt und sich thematisch mit der Farbspaltung überschneidet. Zur übersichtlichen Darstellung dieser gesichteten Literatur werden die unterschiedlichen Forschungsschwerpunkte Partialmodellen zugeordnet. Diese Partialmodelle werden in Abbildung 2.28 und 2.29 dargestellt. Die einfache Separation zweier Platten zeigt das Partialmodell (a) und (b). Das Modell (a) beschreibt die fortgeschrittene Separation einer stabilen Strömung, bei der sich nur ein Filament bildet.

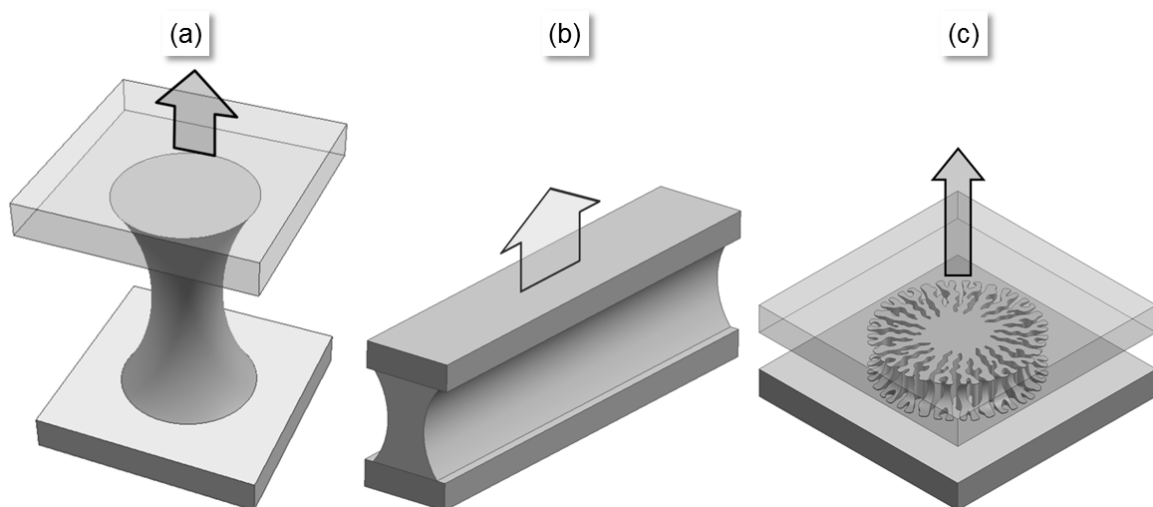


Abbildung 2.28: Partialmodelle auf ideal glatten Oberflächen (a) der fortgeschrittenen stabilen Strömung, (b) die stabile Strömung im Anfangszustand eines Linienkontakts und (c) die instabile Strömung im Anfangszustand.

Dieses Modell findet sowohl in der Theorie als auch in der Praxis seine Anwendung, wohingegen das Modell (b) für rein theoretische Betrachtungen herangezogen wird. Es beschreibt einen Linienkontakt und die stabile Separation im Anfangszustand.

Gezielte Untersuchungen zu instabilen Strömungen zwischen zwei Platten im Anfangszustand zeigt das Modell (c). Alle drei Partialmodelle (a), (b) und (c) finden auf ideal glatten Oberflächen statt.

Neben den bisher gezeigten Partialmodellen gibt es zwei weitere Modelle, die an diese Arbeit angrenzen. Das Modell (d) beschreibt die fortgeschrittene Separation zweier Platten und der dabei durch die Flüssigkeit auftretenden Filamentbildung. Im Anfangszustand der Plattenseparation tritt Instabilität auf. Modell (e) beschreibt die instabile Strömung im Anfangszustand der Plattenseparation bei Anwendung strukturierter Oberflächen (e). Ein weiteres Forschungsfeld ergibt sich aus der morphologischen Betrachtung der bisher aufgezeigten Partialmodelle (a) bis (e). Es ist die Separation eines Linienkontakts auf einer strukturierten Oberfläche in Partialmodell (f) darstellt. Es handelt sich hierbei um wissenschaftliches Neuland, bei dem eine nahezu zweidimensionale Strömung auftritt.

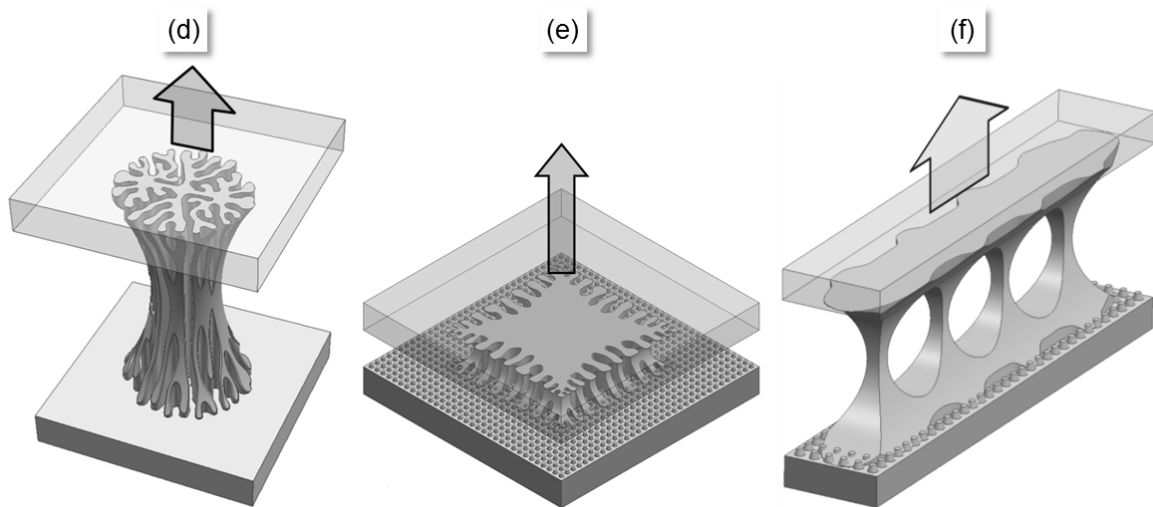
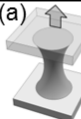
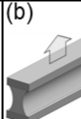
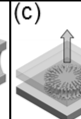
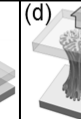
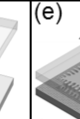
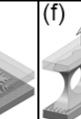


Abbildung 2.29: Partialmodelle (d) der fortgeschrittenen Separation auf ideal glatten Oberflächen, (e) der Separation im Anfangszustand auf strukturierten Oberflächen und (f) der quasi eindimensionalen Separation auf strukturierten Oberflächen.

Das Modell (f) ist für die Drucktechnik insofern von Interesse, da die makroskopisch bzw. grafisch strukturierten Linien der Druckform im Flexodruck auch eine mikroskopische Oberflächenstrukturierung aufweisen. Einflussgrößen aus Separationsvorgängen die die Druckqualität beeinflussen sind kaum bekannt und wurden auch bisher an einfachen Versuchsaufbauten nicht genauer untersucht.

Die genannten Partialmodelle unterscheiden sich von ihrem Themenschwerpunkt kaum. Allerdings tritt häufig ein weiteres Unterscheidungsmerkmal auf. Es wird unterschieden zwischen Newton'schen und nicht-Newton'schen Flüssigkeiten. Die folgende Tabelle 2.1 gibt Aufschluss über die Zuordnung der Partialmodelle und zeigt gleichermaßen die Unterteilung nach Oberflächenstrukturierung der Platten, des Strömungszustandes (stabil u. instabil) und die Art der Flüssigkeit (Newton'sch und nicht-Newton'sch) auf. Sie zeigt einen Ausschnitt von bisher absolvierten Forschungsarbeiten, die für den jeweiligen Forschungsschwerpunkt als Basiswissen angesehen werden. Aufgeführt sind die Autoren, das Erscheinungsjahr und die Literaturstelle der gesichteten Literatur. Auch zeigt die Tabelle, in welchem Bereich viele, wenige oder gar keine Erkenntnisse bzw.

Forschungsergebnisse vorliegen. Die zugeordneten Forschungsschwerpunkte der untersuchten Partialmodelle werden durch ein grau hinterlegtes Feld hervorgehoben (s. Tab. 2.1). Wie zu erkennen ist, gibt es nur wenige Forschungsarbeiten zu instabilen Strömungen auf strukturierten Oberflächen.

<div>Partialmodelle</div> <div>Autor/en; Erscheinungsjahr; Literaturstelle</div> <div><div></div>Forschungsbereich</div>	glatte Oberfläche		strukturierte Oberfläche			
	stabile Strömung		instabile Strömung			
	(a) 	(b) 	(c) 	(d) 	(e) 	(f) 
McKinley; 2000; [MCK00]	<div></div>					
Hele-Shaw; 1898; [HEL98]			<div></div>			
Bataille; 1968; [BAT68]			<div></div>			
Paterson; 1981; [PET81]			<div></div>			
Saffman & Taylor; 1958; [SAF58]			<div></div>	<div></div>		
Shelley, Tian & Wlodars.; 1997; [SHE97]	<div></div>		<div></div>	<div></div>		
Weickg., Roism. & Trop.; 2012; [WEI12]	<div></div>		<div></div>	<div></div>	<div></div>	
Sattler, Wagner & Egg.; 2008; [SAT08]	<div></div>					
Hübner; 1991; [HÜB91]	<div></div>	<div></div>				
Voß; 2000; [VOS00]	<div></div>	<div></div>				
Kaeble; 1971; [KAE71]			<div></div>			
Behler; 1993; [BEH93]			<div></div>			
Rasmussen & Hassager; 1999; [RAS99]			<div></div>	<div></div>		
Rasmussen & Hassager; 2001; [RAS01]			<div></div>	<div></div>		
Ide & White; 1976; [IDE76]	<div></div>			<div></div>		
Yao & McKinley; 1998; [YAO98]	<div></div>			<div></div>		
Hassager, Kolte & Ren.; 1998; [HAS98]	<div></div>			<div></div>		
Bac., Rasm., Lon. & Has.; 2003; [BAC03]	<div></div>			<div></div>		
Spiegelberg & McKinley; 1996; [SPI96]	<div></div>		<div></div>	<div></div>		
McKinley, An., Trip. & Yao; 1999; [MCK99]	<div></div>		<div></div>	<div></div>		
Chiche, Pareige & Creton; 2000; [CHI00]					<div></div>	
Bar.,Ova.,Cha.,Bou.,Rab.&Cou. [BAR10]					<div></div>	

Newton'sche Flüssigkeiten

Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten

Tabelle 2.1: Übersicht und Einordnung von Forschungsarbeiten, die sich wissenschaftlich mit der Farbspaltung auseinandersetzen. Darstellung von Spalte (f) und Verdeutlichung, dass es zur Linienspaltung wie sie im Flexodruck auftritt keine aktuellen Untersuchungen gibt.

In den folgenden zwei Abschnitten wird auf die einzelnen Forschungsarbeiten aus Tabelle 2.1 eingegangen.

2.6.2 Veröffentlichungen mit Newton'schen Flüssigkeiten

MCKINLEY zeigt in seiner Arbeit aus dem Jahre 2000 den Filamentabriss von Newton'schen Flüssigkeiten [MCK00]. Hierzu gibt es eine Vielzahl an Veröffentlichungen. Die Wichtigsten werden unter Kapitel 2.5.2 genannt.

Zu dem Verhalten von Newton'schen Flüssigkeiten zwischen zwei glatten Oberflächen mit konstantem Plattenabstand gab es bereits im Jahr 1898 fundamentale Erkenntnisse zur Fingerentstehung. Dieser Versuchsaufbau wurde nach dem Forscher HELE-SHAW-Zelle benannt [HEL98]. Hierbei bildet Wasser durch das Eindringen des umgebenen Luftmediums strukturierte Finger zwischen den Glasplatten aus. Dieser klassische Versuch der HELE-SHAW-Zelle entspricht nicht der Darstellung des Partialmodells (c), bildet aber im Anfangszustand der Plattenseparation die Grundlage für alle befindlichen Arbeiten in diesem Forschungsfeld.

Im Jahre 1951 beschäftigte sich SAFFMAN und TAYLOR [SAF51] mit der Entstehung der Fingerinstabilitäten bzw. den Fingerstrukturen von Newton'schen Flüssigkeiten in der klassischen HELE-SHAW-Zelle und beschrieb wissenschaftliche Zusammenhänge. Dadurch ergibt sich der Name der SAFFMAN-TAYLOR-Instabilität oder auch der Begriff „Viscous Fingering“. Dies gilt gleichermaßen für das Partialmodell (c) und (d).

Weitere Erkenntnisse mit Newton'schen Flüssigkeiten erzielte BATAILLE [BAT68] im Jahre 1968, der das Prinzip der HELE-SHAW-Zelle anwendete, um kreisförmige Instabilitäten zu erzeugen. Auch PATERSON [PAT81] beschäftigte sich 1981 mit der kreisförmigen Instabilität und betrachtete die Geometrie von langen Fingerstrukturen.

Mit dem zeitlichen Verlauf der SAFFMAN-TAYLOR-Instabilität bei Newton'schen Flüssigkeiten beschäftigten sich 1997 die Wissenschaftler SHELLEY, TIAN und WLODARSKI [SHE97]. Dabei untersuchten sie die Separation zweier Oberflächen und die dabei auftretende Instabilität.

Aktuell forschen zu Newton'schen Flüssigkeiten und der Separation zwischen zwei Platten am Center of Smart Interfaces (CSI) der TU Darmstadt die Wissenschaftler WEICKGENANT, ROISMAN und TROPEA [WEI12]. Hier untersucht man derzeit die Entstehung von Fäden bzw. Filamenten und deren Abriss. Die Versuche überschneiden die Partialmodelle (a), (c) und (d). Auch kommen hier strukturierte Oberflächen zur Anwendung, wie sie das Partialmodell (e) veranschaulicht.

2.6.3 Veröffentlichungen mit nicht-Newton'schen Flüssigkeiten

Betrachtet man die stabile Strömung von nicht-Newton'schen Flüssigkeiten und deren Filamentbildung, so gibt es, wie auch bei Newton'schen Flüssigkeiten, eine große Zahl an Veröffentlichungen. An dieser Stelle wird stellvertretend die Veröffentlichung von

SATTLER, WAGNER und EGGERS [SAT08] aus dem Jahre 2008 genannt, die ebenfalls dem Partialmodell (a) zuzuordnen ist. Hierbei wird die Filamentbildung und deren Abriss von Polymerlösungen (bzw. nicht-Newton'sche Flüssigkeiten) genauer untersucht.

In der Arbeit von HÜBNER [HÜB91] aus dem Jahre 1991 geht es um die Problematik der Flüssigkeitsspaltung von Farbe (nicht-Newton'schen Flüssigkeiten). Hierzu beschreibt er theoretische Ansätze der Partialmodelle (a) und (b), und verwendet diese für eine anschließende Simulation. Mit der erweiterten mathematischen Simulation der von HÜBNER aufgestellten theoretischen Ansätze befasste sich 2000 der Mathematiker VOSS [VOS00].

Im Jahr 1997 erforschte KAEBLE [KAE71] die Instabilität von viskoelastischen Flüssigkeiten im Anfangszustand von sich separierenden Platten. Dabei untersuchte er das Auftreten von Kavitation.

Sowohl mit der Bildung von Kavitation, als auch mit der Entstehung von Fingerinstabilitäten von Prüfolen beschäftigte sich BEHLER [BEH93] 1993 experimentell. Dabei betrachtete er die Plattenseparation im Anfangszustand, wie sie durch das Partialmodell (c) abgebildet wird.

Im Jahre 1999 simulierten RASMUSSEN und HASSAGE [RAS99] die dreidimensionale Entstehung dieser viskoelastischen Fingerinstabilitäten, was die Partialmodelle (c) und (d) überschneidet. Zwei Jahre später, 2001, veröffentlichten RASMUSSEN und HASSAGE eine weitere Forschungsarbeit. Hier geht es um den Einfluss der Oberflächenspannung auf die Entstehung von elastischen Filamenten [RAS01].

Schon 1976 beschäftigten sich IDE und WHITE [IDE76] mit der Entstehung von Filamenten mit flüssigen Polymeren. Diese Untersuchungen bilden einen Zusammenhang von Partialmodell (a) zu (d).

SPIEGELBERG und MCKINLEY [SPI96] veröffentlichten 1996 ihre Erkenntnisse zur elastischen Dehnströmung von Polymerlösungen. Hierbei behandelten sie ebenfalls die Partialmodelle (a), (d) und streiften dabei teilweise (c).

Darauf folgten im Jahr 1998 YAO und MCKINLEY [YAO98], die sich mit der numerischen Simulation der extensionalen Verformung von viskoelastischen Flüssigkeitsbrücken (Fäden bzw. Filamenten) beschäftigten. Im gleichen Jahr veröffentlichten HASSAGE, KOLTE und RENARDY [HAS98] ihre Forschungsergebnisse, bei der sie den Abriss von Flüssigkeitsfäden aufgrund der Einschnürung untersuchten.

MCKINLEY, ANNA, TRIPATHI und YAO [MCK99] untersuchten die Überschneidungen der Partialmodelle (a), (d) und (c) von flüssigen Polymerlösungen bei einachsiger Dehnung und das Verhalten der viskoelastischen Filamente.

Im Jahre 2003 gab es zu den Partialmodellen (a) und (d) eine Veröffentlichung von BACH, RASMUSSEN und HASSAGE [BAC03]. Hierbei ging es um die Dehnviskosität von Polymerlösungen und deren Verhalten im Dehnrheometer.

CHINCHE, RAREIGE und CRETON [CHI00] veröffentlichten im Jahre 2000 eine Arbeit, die sich mit dem Partialmodell (e) und nicht-Newton'schen Flüssigkeiten beschäftigt. Sie untersuchten den Einfluss der Oberflächenrauheit der separierenden Platten und die Adhäsionswirkung zur Flüssigkeit. Auch BARRAL, OVARLEZ, CHATEAU, RABIDEAU und COUSSOT [BAR10] beschäftigten sich 2010 mit der Adhäsion von Flüssigkeiten bei der Separation von Platten. Sie untersuchten ebenfalls den Einfluss von rauen Oberflächen.

Der Stand der Forschung, der in diesem Kapitel zur Flüssigkeitsspaltung aufgeführt ist, soll als Übersicht dienen und erhebt nicht den Anspruch der Vollständigkeit. Es gibt eine Vielzahl weiterer Veröffentlichungen, die den Partialmodellen (a) bis (e) zugeordnet werden können. Was das Partialmodell (f) angeht, wurden keine wissenschaftlichen Arbeiten gefunden.

2.6.4 Flüssigkeitsspaltung zwischen Walzen

Neben den bisher genannten Partialmodellen gibt es weitere Modelle, die sich mit der Flüssigkeitsspaltung zwischen Walzen auseinandersetzen. In der Drucktechnik findet die Farbspaltung im Flexodruck zwischen Walzen und beim Stempeldruck zwischen zwei parallel separierenden Oberflächen statt. In der Übersicht der Partialmodelle (a) bis (f) wird allerdings nur auf die Separation paralleler Platten eingegangen. Betrachtet man die Farbspaltung zwischen Walzen bei einem theoretisch unendlich großen Walzendurchmesser, so liegt ebenfalls eine parallele Plattenseparation vor. In dieser Arbeit wird die Methode der parallelen Plattenseparation angewandt, weshalb die Flüssigkeitsspaltung zwischen Walzen in die Übersicht der Partialmodelle nicht aufgenommen wird. Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle auf Literatur hingewiesen, die sich mit der Flüssigkeitsspaltung zwischen Walzen, der dynamischen Strömungsinstabilität im Druckspalt und der Farbübertragung beschäftigt.

Dazu gehört die Arbeit von WAGENBAUER [WAG64], der sich 1964 mit dem Farbübertrag, als auch mit der Filamententstehung und dem Filamentabriss nach dem Druckspalt beschäftigt hat.

Im Jahre 1998 beschäftigte sich ROSENBERG mit dem Einfluss der Farbspaltung auf die Homogenität von gedruckten Schichten [FOG98].

WILSON, GASKELL und SAVAGE [WIL98] veröffentlichten 2001 eine Arbeit zum Strömungsverlauf in der Kontaktzone zweier Walzen. Hierbei stellten sie den Strömungsverlauf mathematisch dar und simulierten ihn.

FERNANDO, XING und GLASS [FER01] beschäftigten sich 2001 mit dem Filamentabriss nach der Kontaktzone der Walzen und der daraus resultierenden Sprühzerstäubung.

Mit der Riffel-Instabilität (engl. Ribbing Instability) in der Kontaktzone der Walzen beschäftigen sich VARELA LÓPEZ, PAUCHARD, ROSEN und RABAUD im Jahre 2002 [VAR02].

Im Jahre 2006 veröffentlichen ZEVALLOS, CARVALHO und PASQUALI [ZEV05] das Fließverhalten von viskoelastischen Flüssigkeiten beim Walzen-Coating. Hierbei simulierten sie den Strömungsverlauf einer einzelnen Riffel in der Kontaktzone der Walzen.

VOLTAIRE [VOL06] erforschte 2006 die Filmspaltung und die Entstehung von Fäden nach der Kontaktzone der Walzen mit akustischer Messtechnik.

All diese Veröffentlichungen sind nur Ausschnitte aus einem Konvolut von Forschungsarbeiten zu dem Thema „Flüssigkeitsspaltung zwischen Walzen“.

2.7 Zusammenfassung der Grundlagen

In Kapitel 2.1 wird die Einteilung gängiger Druckverfahren nach den Eigenschaften der anwendbaren Farben gezeigt. In Kapitel 2.2 wird auf den Flexodruck, dessen Farbspaltung und die Farbübertragung eingegangen. Dabei wird gezeigt, dass der Druckprozess bis heute nicht vollständig verstanden ist. Auch wird gezeigt, dass der Druckprozess im Flexodruck für die Anwendung des funktionalen Drucks weiterentwickelt werden muss. Es folgen in Kapitel 2.3 die Grundlagen der Adhäsion und Benetzung. Hierzu gehören die Grundlagen der Oberflächenspannung und die Verbindung zum Kontaktwinkel. In Kapitel 2.4 werden die Grundlagen der Rheologie behandelt. Hierzu gehörten die Viskosität, die Scherrate, das Fließverhalten von Flüssigkeiten und die Dehnrheologie. In einem weiteren Schritt wird in Kapitel 2.5 auf die instabile Strömung eingegangen. In Kapitel 2.6 wird deutlich, dass nur wenige Untersuchungen zu der Flüssigkeitsspaltung an strukturierten Oberflächen vorliegen. Gerade im Hinblick auf nicht-Newton'sche Flüssigkeiten wie Farben gibt es nur wenige Untersuchungen. Auch wird gezeigt, dass es zu dem Thema der Farbspaltung unter Anwendung eines strukturierten Linienkontakts keine Veröffentlichungen existieren. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich die Motivation dieser Arbeit, die Farbspaltung unter Anwendung eines strukturierten Linienkontakts näher zu untersuchen. Im folgenden Kapitel wird die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit definiert.

3. Zielsetzung und Vorgehensweise

Der Flexodruck ist bislang aus wissenschaftlicher Sicht noch nicht ausreichend untersucht worden. Beim Druckprozess wirkt eine Vielzahl von Parametern auf die Farbspaltung. Die bisherigen Erkenntnisse geben jedoch keinen vollständigen Aufschluss über die inneren Abläufe der Farbspaltung. Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es daher, die Phänomene beim Ablauf der Farbspaltung im Flexodruck wissenschaftlich zu untersuchen und die dabei gewonnen Erkenntnisse zu ihrer Optimierung darzustellen.

Beim Drucken von funktionalen Schichten wird die mikroskopische Oberflächenstrukturierung der Druckform dafür verwendet, unterschiedlichste Flüssigkeiten druckbar zu machen. Speziell beim Drucken von Kondensatoren und Antennenspulen werden grafisch strukturierten Linien der Druckform mit einer mikroskopischen Oberflächenstrukturierung versehen, um die funktionalen Flüssigkeiten zu übertragen. Wie der Farbspaltungsvorgang bei strukturierten Linien abläuft, wurde bislang noch nicht wissenschaftlich betrachtet. Dadurch ergibt sich die erweiterte Zielsetzung dieser Arbeit, nämlich, die Farbspaltung unter der Anwendung einer Flexodruckform mit einer strukturierten Linie zu untersuchen.

Bei der Anwendung eines Linienkontakts wird angenommen, dass die Strömungsvorgänge der Druckfarbe im zweidimensionalen Zustand vorliegen und dadurch die Einflussgrößen der Oberfläche der Druckform leichter zu verifizieren sind.

Als Substrat wird eine vollflächige Glasoberfläche verwendet, wie sie z. B. bei gedruckten Solarzellen ihre Anwendung findet. Als Ersatz für funktionale Flüssigkeiten kommen UV-Farben zum Einsatz, die ihre chemische Zusammensetzung bei der Farbspaltung nicht verändern.

Um Einflussgrößen wie z. B. das Walken in der Druckmaschine zu reduzieren, wird zur experimentellen Simulation der Farbspaltung die parallele Plattenseparation angewendet. Damit die parallele Plattenseparation simuliert werden kann, wird ein Dehnrheometer umgebaut und mit einem optischen System ausgestattet, das eine Highspeed-Kamera beinhaltet. Hierdurch kann der Vorgang der Farbspaltung in einer hohen zeitlichen Auflösung erfasst werden.

Ziel ist es, die Entstehung von Phänomenen und deren Abfolge bei der Farbspaltung im Rahmen einer Parameterstudie zu untersuchen. Hierbei wird der Ist-Tonwert, der Rasterwinkel und die Rasterweite der Druckform variiert, um deren Einfluss auf die Farbspaltung festzustellen. Gleichzeitig wird untersucht, wie sich die Art der Flüssigkeit, deren Menge und die Separationsgeschwindigkeit auf die Filamentbildung auswirken. Der Hautaufriss und der Filamentabriss werden dazu methodisch ausgewertet und diskutiert. Die dabei empirisch-experimentell gewonnen Erkenntnisse werden in der vorliegenden Arbeit dokumentiert, um das Wissen der Farbspaltung im Flexodruck zu erweitern.

4. Charakterisierung

Bei der Farbspaltung wirkt eine Vielzahl von Einflussgrößen, die jedoch nicht ausreichend wissenschaftlich verstanden sind. Es ist nicht bekannt, welchen Einfluss die einzelnen Kontaktpartner wie Festkörperoberflächen und Flüssigkeiten auf die Farbspaltung ausüben. Deshalb wird im Vorfeld der experimentellen Versuche zur Farbspaltung eine Untersuchung der einzelnen Kontaktpartner durchgeführt. Im vorliegenden Kapitel werden die verwendeten Flüssigkeiten und Oberflächen der Druckform analytisch charakterisiert. In einem weiteren Schritt folgen die Charakterisierung der Oberflächenspannung und der Benetzungseigenschaften von Flüssigkeiten auf der Druckformoberfläche. Hierzu werden bekannte wissenschaftliche Methoden angewandt. Die Charakterisierung ist unabdingbar, um mögliche Einflussgrößen auf die Farbspaltung bei den experimentellen Versuchen zu identifizieren.

4.1 Oberflächencharakterisierung

Im Abschnitt Oberflächencharakterisierung wird auf die in dieser Arbeit verwendeten Oberflächenprofile der Druckform eingegangen. Hierzu werden die Oberflächen mithilfe der Konfokalmikroskopie untersucht.

4.1.1 Konfokalmikroskopie

Die Konfokalmikroskopie ist grundsätzlich eine Art der Lichtmikroskopie zur optischen Bildgebung von Profilen. Hierzu wird das Objekt (Probe oder Präparat) nur an den im Augenblick gemessenen Stellen beleuchtet. Das Objekt wird hierzu mit einem Lichtpunkt, Stelle für Stelle, streifenweise abgetastet. Dabei wird die Intensität des Lichtes, das von dem Objekt reflektiert wird, gemessen. So entstehen von dem Profil der Oberfläche einzelne Mosaikaufnahmen, die dann später zu einem Gesamtbild zusammengesetzt werden [SCH07]. Im folgenden Abschnitt wird die Konfokalmikroskopie und deren Funktionsprinzip am Beispiel des Konfokalmikroskops „Plμ Neox“ der Firma Sensofar veranschaulicht. Durch eine Lichtquelle (LED) wird ein Lichtpunkt in der Fokusebene des Objekts erzeugt (s. Abb. 4.1). Hierzu wird eine blaue LED mit einer Wellenlänge von 460 nm eingesetzt. Das reflektierte Licht des Objekts durchläuft die Linse (Objektiv), den Strahlteiler und die Kollimatoren und wird auf einem punktförmigen Detektor (CCD-Kamera) fokussiert. Dabei wird das Lichtsignal nur dann maximal, wenn die Beleuchtungs- und Detektionseinheit in einem Punkt (konfokal) in der Fokusebene vereint sind. Zur Erzeugung des Lichtpunkts wird das Licht von der LED zunächst auf ein LCoS (Liquid Crystal on Silicon) Mikro-Display umgeleitet. Mit diesem Display können einzelne Lichtpunkte an- und ausgeschaltet werden. Bei konventionellen Aufbauten werden anstelle des Mikro-Displays Lochblenden sowohl vor der Lichtquelle als auch in

dem Detektor integriert. Dies ermöglicht die Unterdrückung von lateralem Streulicht, wodurch sich ein höherer Kontrast ergibt. Gleichzeitig reduzieren die Lochblenden das Streulicht von nicht-fokussierten Ebenen. Dadurch ergibt sich eine reduzierte Schärfentiefe. Bei dem Aufbau des „Plμ Neox“ wird auf die Lochblenden verzichtet, da man durch die Kombination von LEDs (LED-Feld), Kollimatoren, LCoS Mikro-Display und CCD-Kamera den gleichen Effekt erzielt (s. Abb. 4.1). Hierbei wird die Oberfläche sowohl lateral, als auch vertikal Punkt für Punkt abgerastert und somit ausgemessen [BER07], [BOR10], [SCH07], [SEN09].

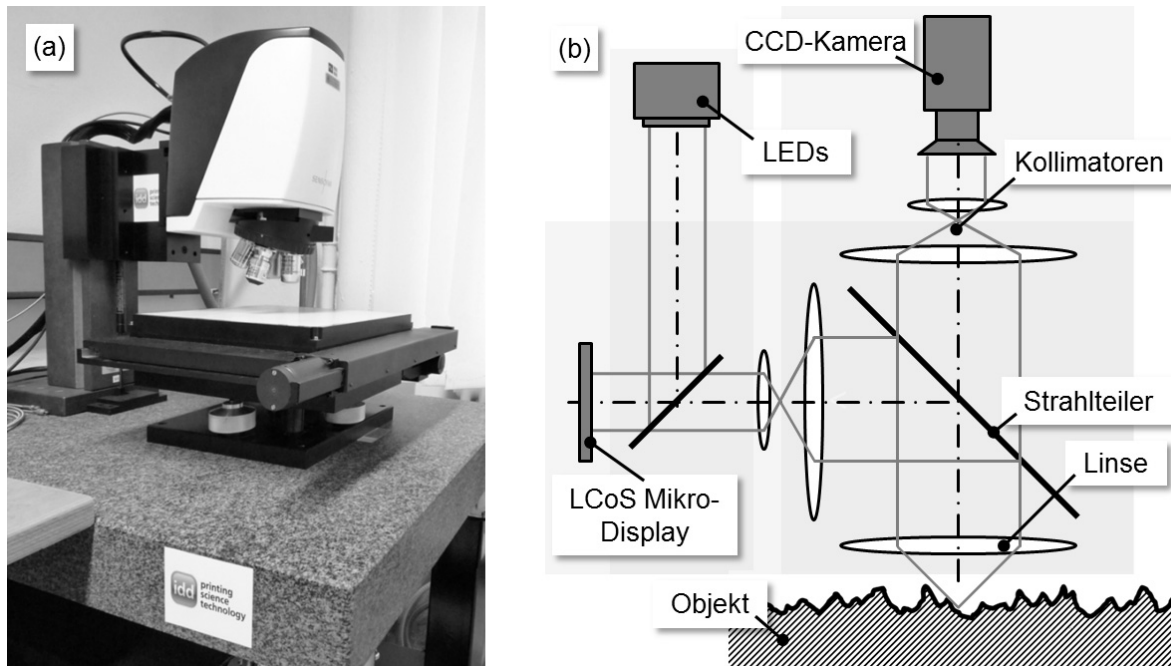


Abbildung 4.1: Konfokalmikroskop „Plμ Neox“ der Firma Sensofar (a) und der schematische Aufbau (b) [BER07], [BOR10], [SEN09].

Der vertikale Messbereich des „Plμ Neox“ liegt zwischen $0,1\text{ nm}$ und einigen wenigen Nanometern. Dies wird möglich mit der Methode des dual vertikalen Scanners aus der Kombination von Linearscanner und Piezoscanner zur Bestimmung des Verfahrwegs. Der duale vertikale Scanner besteht aus einem motorisierten Tisch mit einer hohen Positionsauflösung ($< 10\text{ nm}$), wodurch eine hohe Messgenauigkeit, Linearität und Reproduzierbarkeit erreicht wird [BER07], [BOR10], [SEN09]. Die Lichtausbeute der Lichtquelle und die Anwendung eines Kontrast-Algorithmus es, ermöglicht Oberflächen mit besonderen Geometrien zu vermessen. Hierzu gehören z. B. glatte Oberflächen mit steilen Hängen, rauen Oberflächen und reflektierenden Proben aus unterschiedlichen Materialien [BOR10], [SEN09]. Für das konfokale Scannen verwendet das Sensofar „Plμ Neox“ die patentierte Technologie des LCoS Mikro-Displays, das auf dem Verhalten von ferroelektrischen Flüssigkristallen auf Silizium basiert. Hierdurch benötigt das Gerät „Plμ Neox“ zur lateralen Rasterung keine beweglichen Teile, wodurch sich die Geschwindigkeit des Scannvorgangs erhöht [BER07], [BOR10], [SEN09]. In dieser Arbeit wurde zur Bestimmung der Oberflächentopografie der Druckform ein 50-faches Objektiv verwendet.

Dadurch ergeben sich eine vertikale Auflösung von $< 3 \text{ nm}$ und eine laterale Auflösung von $0,17 \mu\text{m}$. Zur Auswertung der Fläche wurde die Software „SensoMAP Plus“ der Firma Sensofar verwendet [SEN09].

4.1.2 Ergebnisse der Flächenanalyse

Die verwendeten Druckformen dieser Arbeit werden topografisch vermessen und ausgewertet. Es handelt sich hierbei um Flexodruckformen der Firma Flint Group. Ihre genaue Bezeichnung lautet Nyloflex FAH mit 48 Linien/cm und 60 Linien/cm [FLI12]. Hierzu werden druckende Flächen mit einem Soll-Tonwert von 5 % bis 100 % vermessen und deren Profil ausgewertet (s. Abb. 4.2).

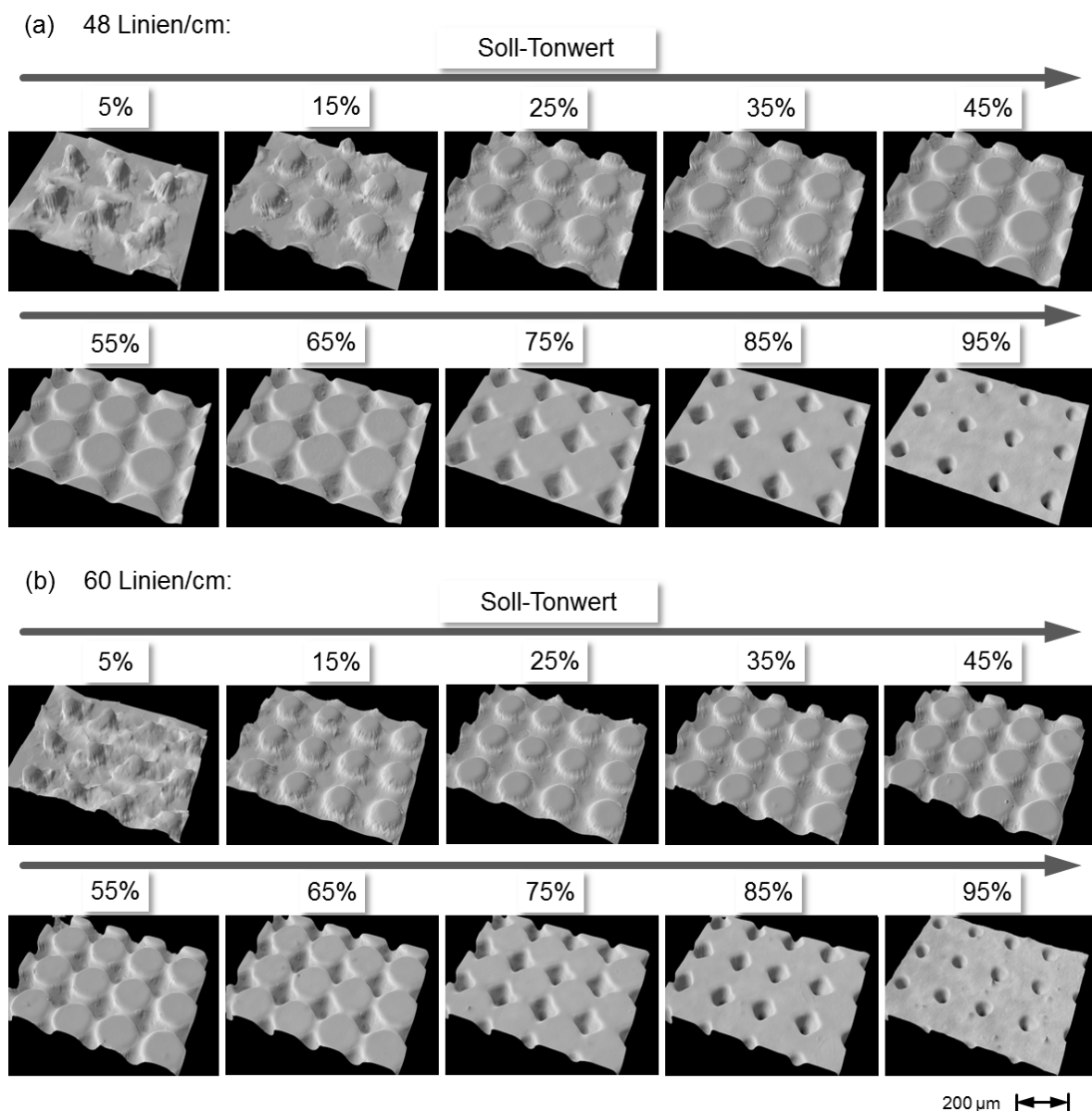


Abbildung 4.2: Topografische Darstellung der Druckform bei 48 Linien/cm (a) und 60 Linien/cm (b).

Der Soll-Tonwert ist der erwartete Tonwert bei der Herstellung der Druckform. Abbildung 4.2 zeigt die geometrische Änderung der Oberflächenstrukturierung aufgrund der Zunahme des Soll-Tonwerts. Bei der Zunahme des Soll-Tonwerts in Abständen von 10 % wachsen die einzelnen Rasterpunkte zusammen und verschmelzen miteinander. Der geometrische Aufbau der Oberfläche ist grundsätzlich bei jedem Soll-Tonwert unterschiedlich. Mit Zunahme des Soll-Tonwerts verschmelzen zunächst die Sockel der Rasterpunkte miteinander. Später verschmelzen die einzelnen druckenden Flächen der Rasterpunkte zu einer Gesamtfläche. Es ist bis heute nicht geklärt ob die Farbe, die von der Rasterwalze auf die Druckform übertragen wird, nur an den erhabenen Stellen haftet oder teilweise in den Tälern dazwischen gespeichert wird. Wenn es zutrifft, dass die Farbe auch zwischen den Rasterpunkten bzw. Rasterflächen in den Tälern gespeichert werden kann, wäre der Flexodruck dem Tiefdruck sehr ähnlich. Beim Tiefdruck wird der Großteil der zu übertragenden Farbe in deren Vertiefungen bzw. Näpfchen gespeichert. Ab einem Soll-Tonwert von ca. 70 % bilden sich bei den in dieser Arbeit verwendeten Druckformen einzelne Täler. Diese Täler im Flexodruck sind denen des Tiefdrucks sehr ähnlich.

In Abbildung 4.2 ist zu erkennen, dass sich bei einem Soll-Tonwert von 5 % die Sockelgeometrie der Rasterpunkte als Karo zeigt. Dabei stimmt die Ausrichtung der Karos mit der des Rasterwinkels von $52,5^\circ$ überein. Es ist nicht geklärt, ob dieses Verhalten von den sich vernetzenden Polymeren, der Belichtung der Druckform oder durch den anschließenden Reinigungsprozess mit Bürsten kommt.

Im Rahmen dieser Arbeit ist es wichtig, die Oberflächen der Druckform im Vorfeld genau zu charakterisieren. Hierzu wird der Ist-Tonwert mithilfe der Software „SensoMAP Plus“ und einer hierfür speziell entwickelten Auswertemethodik ausgewertet. Hierbei wird ein Unterschied zwischen dem Soll-Tonwert und dem Ist-Tonwert, der dem druckenden Flächenanteil entspricht, festgestellt. Tabelle 4.1 zeigt den Vergleich beider Tonwerte bei 48 und 60 Linien/cm.

Soll-Tonwert	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
Ist-Tonwert (48 Linien/cm)	0%	2,29%	8,22%	12,48%	17,13%	22,45%	27,53%	31,08%	37,65%	42,15%	45,80%
Ist-Tonwert (60 Linien/cm)	0%	2,29%	5,16%	12,70%	18,20%	23,03%	27,40%	31,60%	36,83%	42,75%	44,63%

Soll-Tonwert	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
Ist-Tonwert (48 Linien/cm)	52,03%	56,53%	61,38%	64,58%	70,50%	75,18%	80,38%	84,59%	89,40%	100%
Ist-Tonwert (60 Linien/cm)	46,48%	53,28%	56,30%	61,73%	66,10%	71,20%	76,48%	82,13%	88,98%	100%

Tabelle 4.1: Darstellung des Soll-Tonwerts im Vergleich zum Ist-Tonwert bzw. dem druckenden Flächenanteil bei 48 und 60 Linien/cm.

Bei Anwendung der Konfokalmikroskopie als Messmethode und der Handhabung der Auswertesoftware kommt es bei Mehrfachmessung zu einer Varianz des Tonwerts. Der wahre Wert des Ist-Tonwerts ist nicht bekannt und wird statistisch durch Mehrfachmessungen und anschließender Bestimmung der Standardabweichung mittels Fehlerfortpflanzung ermittelt. Alle Werte aus Tabelle 4.1 liegen in einem Vertrauensbereich von 95 % vor. Abbildung 4.3 veranschaulicht die Mittelwerte des (gemessenen) Ist-Tonwerts bei Zunahme des Soll-Tonwerts. Auch wird im Diagramm die Standardabweichung bei einer Konfidenz von 95 % der einzelnen Ist-Tonwerte dargestellt.

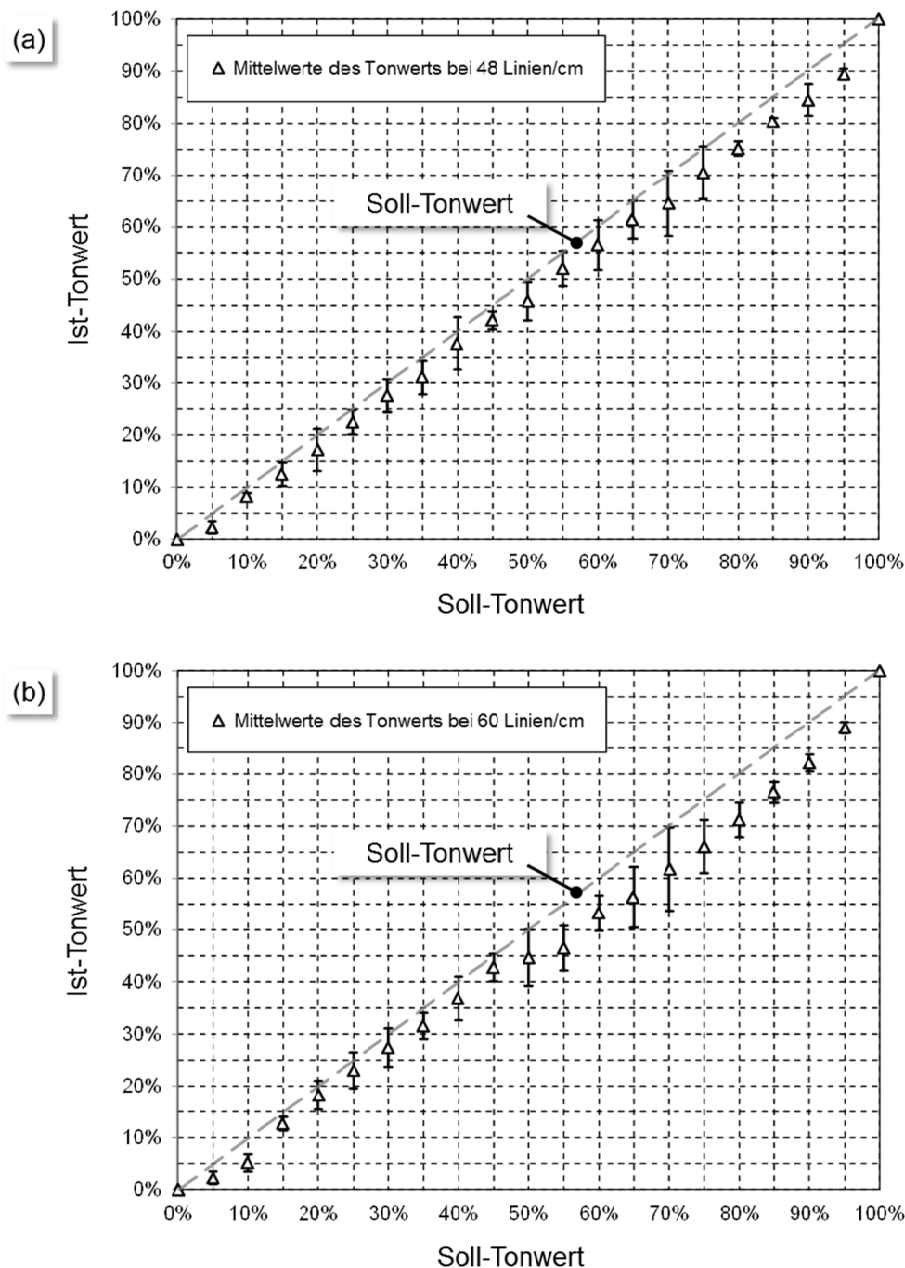


Abbildung 4.3: Darstellung der Mittelwerte des (gemessenen) Ist-Tonwerts zum Soll-Tonwert bei 48 Linien/cm (a) und 60 Linien/cm (b).

Die Ergebnisse zur Bestimmung des Ist-Tonwerts gelten der Charakterisierung der in dieser Arbeit verwendeten Druckform und nicht der Aufdeckung von Herstellungsfehlern.

An dieser Stelle sei gesagt, dass die Druckformrohlinge zwar von der Firma Flint Group hergestellt wurden, aber nicht deren spätere Strukturierung. Der Hersteller und gleichzeitige Lieferant der Druckform wird in dieser Arbeit ausdrücklich nicht genannt. Auch wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass zwischen dem Hersteller und dem Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren keine Korrekturschleife, was die Auflösung und den Verzerrungsfaktor angeht, durchgeführt wurde. So hätte man Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Tonwert verringern können. Dies ist für die vorliegende Arbeit jedoch nicht relevant, da es primär um den Einfluss von strukturierten Oberflächen auf die Farbspaltung und deren Analyse geht und nicht um die Anwendung von idealisierten Druckformen. Bei den durchgeführten topografischen Messungen wird ebenfalls sichtbar, dass die druckenden Flächen der Rasterpunkte unabhängig von der Messmethode der Konfokalmikroskopie eine gewisse Varianz, was die Kontur der druckenden Flächen angeht, aufzeigen. Dies wird grundsätzlich auf die Materialeigenschaften der Druckform und deren Herstellungsprozess zurückgeführt. Gerade der Prozess der Vernetzung von Polymeren in der Druckform ist sehr komplex.

Eine weitere Betrachtung ist die der Größe der Oberfläche der Druckform. Mit der Größe der Oberfläche ist der Überschuss an Flächeninhalt der Druckform gegenüber ihrer geometrischen Grundfläche gemeint. Hierzu wird die Auswertung ebenfalls mit der eigens hierfür entwickelte Methodik unter Anwendung der Software „SensoMAP Plus“ durchgeführt. Dabei werden pro Ist-Tonwert 20 Messungen auf der Druckform durchgeführt. Die Ergebnisse bei einer Druckform mit 48 Linien/cm stellen sich mit Zunahme des Ist-Tonwerts wie folgt dar (s. Abb. 4.4).

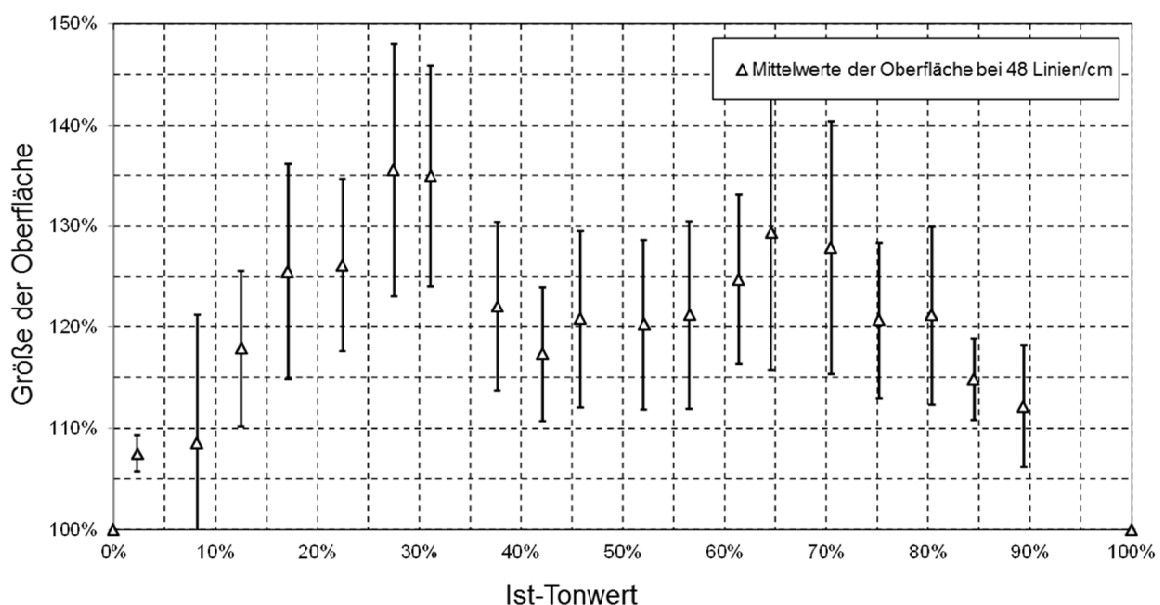


Abbildung 4.4: Darstellung der Größe der Oberfläche über dem Ist-Tonwert bei 48 Linien/cm.

In Abbildung 4.4 sind die Mittelwerte der gesamten Größe der Oberfläche bei 48 Linien/cm über dem Ist-Tonwert in Prozent abgebildet. Bei der topografischen Vermessung der Oberfläche ergeben sich, genau wie bei der Bestimmung des Ist-

Tonwerts, Fehler, deren Standardabweichung als Fehlerbalken mit einem Vertrauensbereich von 95 % dargestellt sind. Die folgende Abbildung zeigt die Mittelwerte der gesamten Größe der Oberfläche bei 60 Linien/cm (Abb. 4.5). Hier liegt ebenfalls eine Sicherheit der Standardabweichung bei einer Konfidenz von 95 % vor.

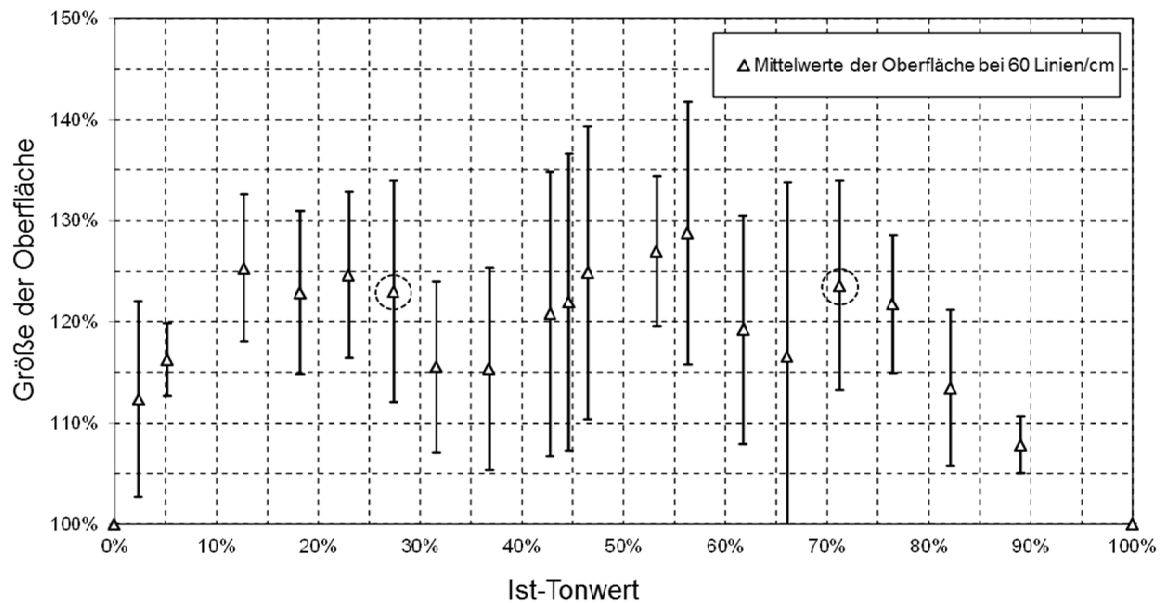


Abbildung 4.5: Darstellung der Größe der Oberfläche über dem Ist-Tonwert bei 60 Linien/cm.

In den Abbildungen 4.4 und 4.5 wird der Überschuss an Flächeninhalt der Druckform gegenüber ihrer geometrischen Grundfläche als Funktion des Ist-Tonwerts gezeigt. Mit Zunahme des Ist-Tonwerts finden zwei Veränderungen statt. Diese sind zum einen die Änderung der gesamten Größe der Oberfläche mit der Vergrößerung der Rasterpunkte und zum anderen, die sich daraus ergebende Änderung der Oberflächenstrukturierung. Diese beiden Größen sind im Fall dieser Arbeit voneinander abhängig. Die in Abbildung 4.5 beispielhaft mit einem Kreis gekennzeichneten Werte zeigen bei unterschiedlichen Tonwerten in etwa die gleiche Gesamtgröße der Oberfläche. Dabei liegt, wie in Abbildung 4.2 zu sehen ist, eine unterschiedliche Oberflächenstrukturierung vor. Aus wissenschaftlicher Sicht ist es denkbar, definierte Oberflächenstrukturierungen zu verwenden, um Abhängigkeiten der beiden Größen zu eliminieren oder zu analysieren. Dies ist in dieser Arbeit nicht vorgenommen worden, da es ein primäres Ziel dieser Arbeit ist, typische Druckformen aus der Praxis der grafischen Industrie zu verwenden.

Will man in Zukunft das „funktionale Drucken“ für die Herstellung von Vollflächen anwenden, kann der Flexodruck eine Methode sein, um definierte Schichtdicken zu übertragen. Es werden beim „funktionalen Drucken“ unterschiedlichste Flüssigkeiten verdruckt. Deren Verdruckbarkeit durch die Anpassung der Flexodruckform realisiert wird. Dies kann z. B. durch die Anpassung einer definierten Strukturierung oder Änderung des Soll-Tonwerts, der Linienzahl pro Zentimeter und der Wahl eines geeigneten Materials der Druckform erfolgen.

4.2 Fluidcharakterisierung

Um das dynamische Verhalten von Druckfarbe im Druckprozess zu verstehen, müssen die verwendeten Flüssigkeiten charakterisiert werden. Im folgenden Abschnitt wird auf die Flüssigkeitscharakterisierung mithilfe der Rotationsrheometrie eingegangen.

4.2.1 Rotationsrheometer

Das Rotationsrheometer dient der Charakterisierung von Flüssigkeiten im Hinblick auf deren viskose Eigenschaften. Hierbei wird die Flüssigkeit einer Scherbelastung zwischen einer stationären und einer oszillierenden bzw. rotierenden Fläche ausgesetzt (s. Abb. 4.6 (b)). Dabei wird mittels eines Sensors das zur Erzeugung der Bewegung erforderliche Drehmoment gemessen. Aus dem Drehmoment und der Geometrie des Messsystems wird die Viskosität der Flüssigkeit berechnet. Abbildung 4.6 zeigt das Rotationsrheometer HAAKE MARS II der Firma Thermo Fischer und deren schematischer Aufbau des Kegel-Platten-Messsystems [NEU09], [THE12].

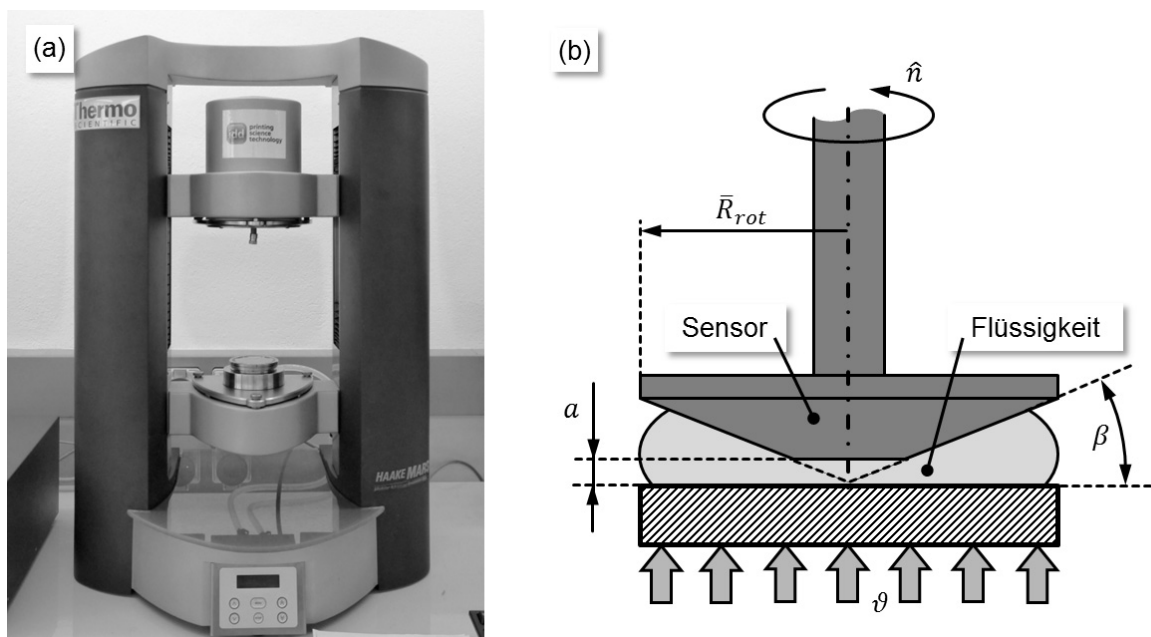


Abbildung 4.6: Dehnrheometer HAAKE MARS II (a) und schematische Darstellung des Kegel-Platten-Messsystems (b).

Die Kegelspitze (Abb. 4.6 (b)) ist abgeflacht, um Reibung zwischen dem Kegel und der unteren Platte zu vermeiden. Hier ist ebenfalls dargestellt, dass eine Temperierung des Messsystems möglich ist und die Wärmeinleitung durch die untere Platte erfolgt. Der Plattenabstand a wird durch den Durchmesser des Sensors und den Kegelwinkel β definiert. Die Scherrate ist bei dem Kegel-Platten-Messsystem über dem gesamten Messspalt konstant. Limitiert wird die Scherrate durch die Zentrifugalkraft. Bei einer zu hohen Drehzahl kommt es durch die Zentrifugalkräfte zur Entleerung des Spalts [NEU09].

Die gemessenen Größen des Rotationsrheometers werden durch die folgenden Formeln berechnet [SCH95]. Die Scherrate $\dot{\gamma}$ ergibt sich aus

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{1}{\tan \beta} \right) \cdot \hat{n} \cdot 2 \cdot \pi = \hat{n} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\tan \beta} \quad [\dot{\gamma}] = s^{-1} . \quad (\text{Gleichung 4.1})$$

Dabei ist der Kegelwinkel β und die Drehzahl \hat{n} . Die Schubspannung τ ergibt sich aus dem Drehmoment M und dem Radius \bar{R}_{rot} zu

$$\tau = M \cdot \left(\frac{3}{2 \cdot \pi \cdot \bar{R}_{rot}^3} \right) \quad [\tau] = Pa . \quad (\text{Gleichung 4.2})$$

Daraus ergibt sich die Scherviskosität (dynamische Viskosität) η wie folgt [NEU09], [SCH95]:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{M}{\hat{n}} \cdot \frac{3 \cdot \tan \beta}{4 \cdot \pi^2 \cdot \bar{R}_{rot}^3} \quad [\eta] = Pa \cdot s . \quad (\text{Gleichung 4.3})$$

4.2.2 Fließverhalten von Flüssigkeiten

Im Folgenden wird auf die für diese Arbeit relevanten Flüssigkeiten und auf deren Eigenschaften eingegangen. Tabelle 4.2 zeigt die genaue Bezeichnung der Flüssigkeiten und deren spezifische bzw. grundsätzliche Eigenschaften.

Bezeichnung	Nr.	Spezifische Eigenschaft	Flüssigkeitseigenschaft
Wasser	1.	destilliert	Newton'sch
Glycerin	2.	Reinheit zu 99,5 %	
Aqualabel Black 774083S	3.	wasserbasierte Farbe (Flexodruck)	nicht-Newton'sch
Magenta 39-6 (Sicura Flex)	4.	UV-Farbe (Flexodruck)	
Magenta 36-2 (Sicura Flex)	5.	UV-Farbe (Flexodruck)	

Tabelle 4.2: Auflistung der in dieser Arbeit verwendeten Flüssigkeiten, deren Bezeichnung und spezifischen bzw. grundsätzlichen Eigenschaften.

Hierbei handelt es sich um zwei Newton'sche Flüssigkeiten wie Wasser und Glycerin sowie um drei nicht-Newton'sche Flexodruckfarben. Alle Untersuchungen zur Charakterisierung wurden am HAAKE MARS II durchgeführt. Hierzu wurde ein Kegel mit einem Durchmesser von 60 mm und einem Kegelwinkel β von 1° eingesetzt. Der Einfluss einer sich ändernden Temperierung wird in dieser Arbeit nicht betrachtet. Alle Untersuchungen fanden bei einer Raumtemperatur von 23 °C statt. Die Fließ- und Viskositätskurven des Wassers sind in Abbildung 4.7 dargestellt.

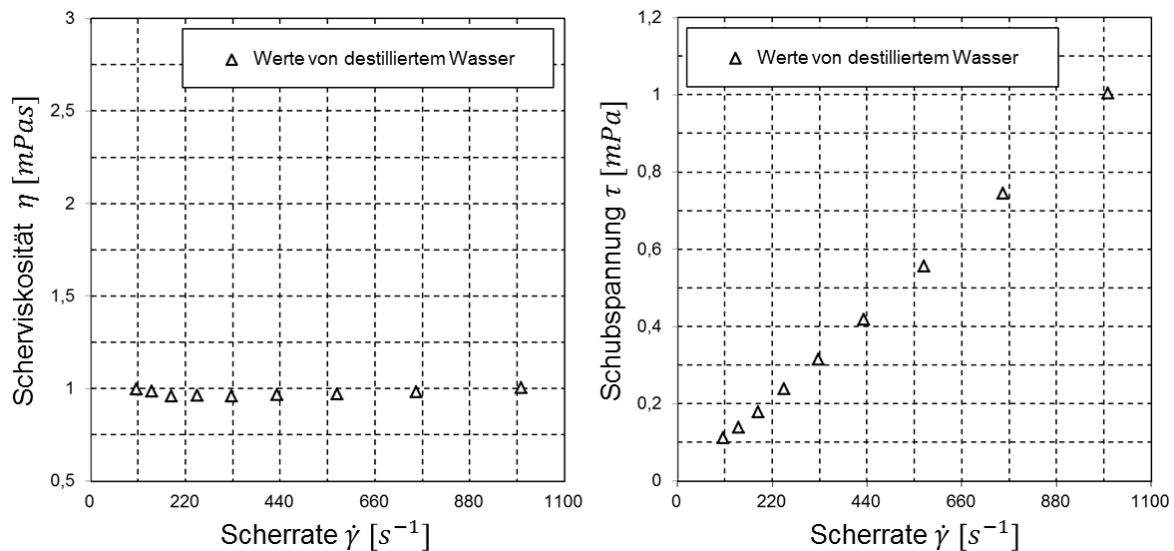


Abbildung 4.7: Darstellung der gemessenen Viskositäts- und Fließkurve von destilliertem Wasser.

In Abbildung 4.7 ist die Scherviskosität von destilliertem Wasser über der Scherrate aufgetragen. Dabei bleibt der Wert der Scherviskosität mit Zunahme der Scherrate konstant. Bei der Untersuchung ergibt sich eine konstante Scherviskosität η von ca. 1,0 mPas mit Anstieg der Scherrate $\dot{\gamma}$. Diese ähnelt dem Literaturwert von 1,0087 mPas (20 °C) [BÜR11]. Die Schubspannung τ steigt linear zur Scherrate $\dot{\gamma}$, was charakteristisch für Newton'sche Flüssigkeiten ist.

Als weitere Newton'sche Flüssigkeit wird handelsübliches Glycerin aus dem Chemiebedarf mit einer Reinheit von 99,5 % charakterisiert. Abbildung 4.8 zeigt das gemessene Viskositäts- und Fließverhalten von dem in dieser Arbeit verwendeten Glycerin.

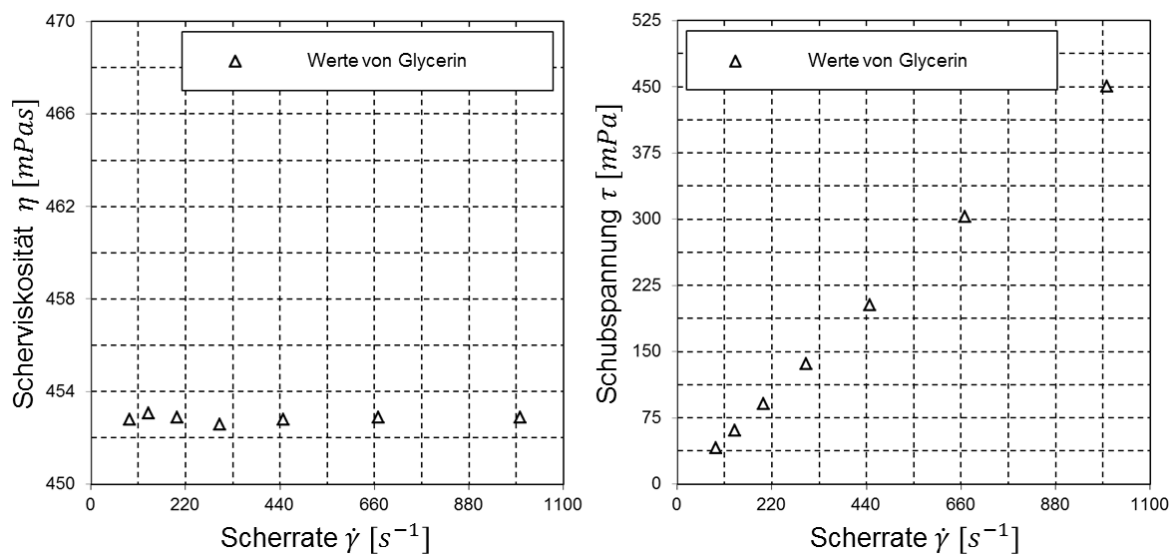


Abbildung 4.8: Darstellung der gemessenen Viskositäts- und Fließkurve von Glycerin.

Abbildung 4.8 zeigt das konstante Verhalten der Scherviskosität η bei 453 mPas mit Zunahme der Schwerrate und einer Raumtemperatur von 23 °C. Die Reinheit des Glycerins ist mit 99,5 % angegebenen. Charakteristische Werte der Scherviskosität η aus der Literatur [AND05] sind bei Glycerin, mit einem Wasseranteil von 0,5 %, ca. 1300 mPas (20 °C). Es wird daher vermutet, dass das Glycerin aus Alterungsgründen Wasser eingelagert hat und so eine Änderung von ca. 750 mPas erfährt. Wie viel Wasser im Glycerin vorliegt oder ob es an anderen Alterungserscheinungen liegt, ist nicht bekannt. Das Glycerin zeigt bei der Viskositäts- und Fließkurve weiterhin ein Newton'sches Verhalten. Es wird entschieden, das untersuchte Glycerin mit einer Scherviskosität η von 453 mPas für die Experimente der Farbspaltung zu verwenden. Dadurch wird dennoch ein relativ großer Viskositätsbereich der Scherviskosität mit den verwendeten Flüssigkeiten abgedeckt.

Bei den nicht-Newton'schen Flüssigkeiten (z. B. Flexodruckfarben) zeigt sich beim Verlauf der Viskositäts- und Fließkurve ein anderes Verhalten als bei Newton'schen Flüssigkeiten. Die in dieser Arbeit verwendeten Farben besitzen ein strukturviskoses Verhalten, das in Kapitel 2.4.2 näher beschrieben ist. Abbildung 4.9 zeigt den gemessenen Verlauf des Viskositäts- und Fließverhaltens einer wasserbasierten Flexodruckfarbe „Aqualabel Black 774083 S“ der Firma Siegwerk Druckfarben [SIE12].

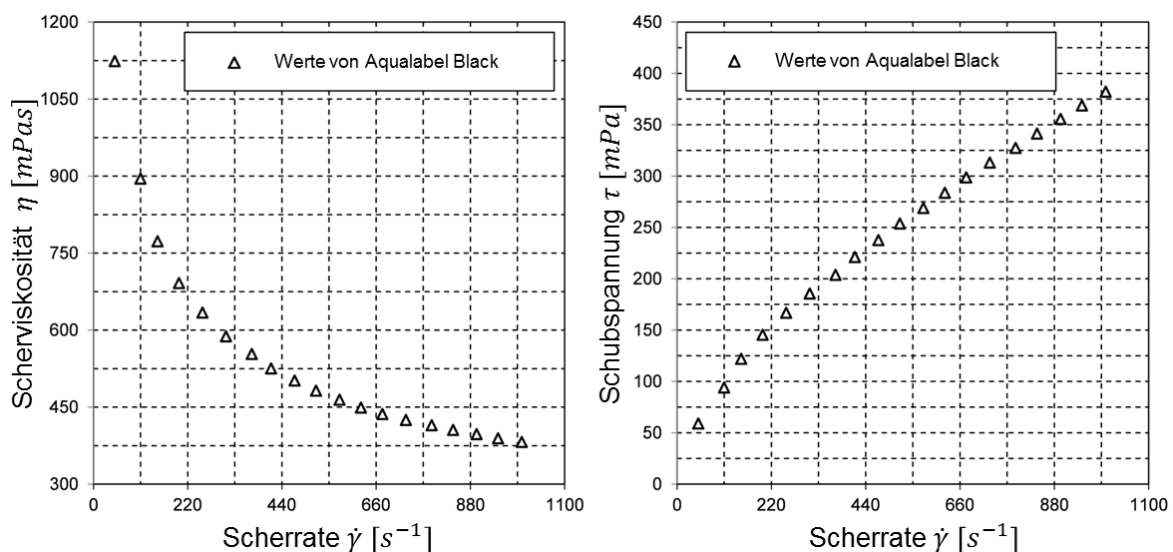


Abbildung 4.9: Darstellung der gemessenen Viskositäts- und Fließkurve von Aqualabel Black 774083 S.

Abbildung 4.9 zeigt das strukturviskose und nichtlineare Verhalten der Flexodruckfarbe Aqualabel Black. Mit Zunahme der Schergeschwindigkeit sinkt die Scherviskosität, die sich einem Wert von ca. 375 mPas annähert. Grundsätzlich geht aus dem Verlauf der Scherviskosität ein strukturviskoses Verhalten hervor. Allerdings ist der Verlauf der Schubspannung nicht eindeutig, da hier eine Mischform von strukturviskosen und Bingham'schen Verhalten vorliegen kann (s. Kapitel 2.4.3). Dies bedeutet, dass eine Mindest-Schubspannung nötig ist, damit die Flüssigkeit anfängt zu fließen. In der Arbeit

von NEUMANN [NEU09] wird das Verhalten von Dispersionen diskutiert. Hierbei beschreibt er Dispersionen, die zum Großteil aus einem Trägermedium wie Wasser und aus dispergierten Partikeln bestehen. Die Partikel neigen im Ruhezustand zu Agglomeraten. Diese lassen sich nur durch eine Mindest-Schubspannung aufbrechen. Je größer die Schubspannung ist, desto mehr Agglomerate lösen sich. Die Viskosität der Dispersion nimmt dadurch ab. Ebenfalls ein strukturviskoses Verhalten zeigen die UV-Farben Magenta 39-6 und 36-2 der Firma Siegwark Druckfarben. Deren Viskositäts- und Fließverläufe sind in den Abbildungen 4.10 und 4.11 dargestellt.

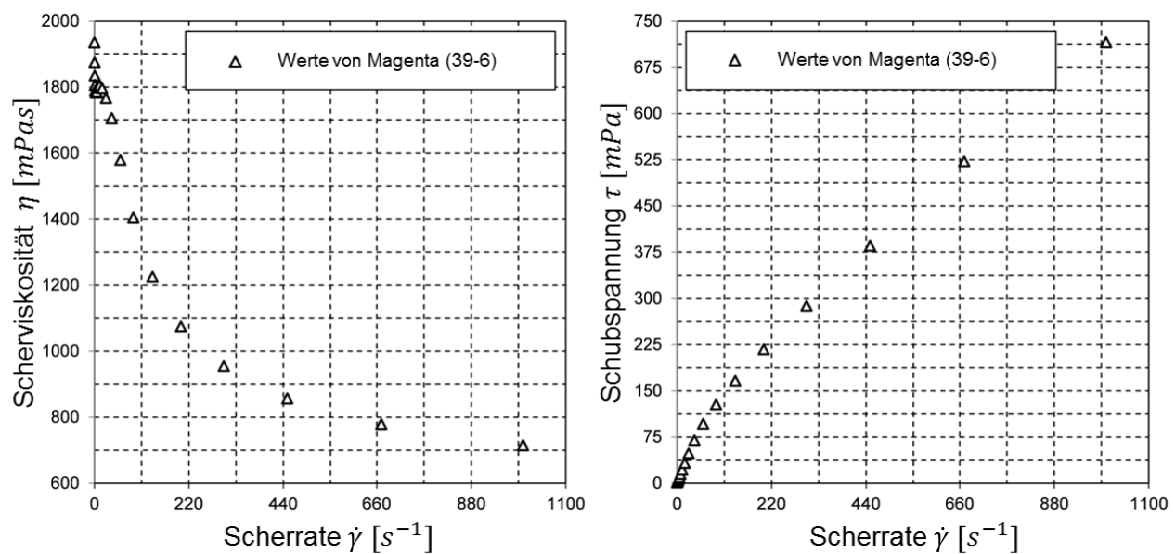


Abbildung 4.10: Darstellung der gemessenen Viskositäts- und Fließkurve von Magenta 39-6.

Bei den Flexodruckfarben Magenta 39-6 und 36-2 zeigen die Kurven einen ähnlichen Verlauf wie bei der Dispersionsfarbe Aqualabel Black. Grund hierfür kann ebenfalls der Anteil an Feststoffteilchen sein, der auch hier zu einem strukturviskosen Verhalten führt.

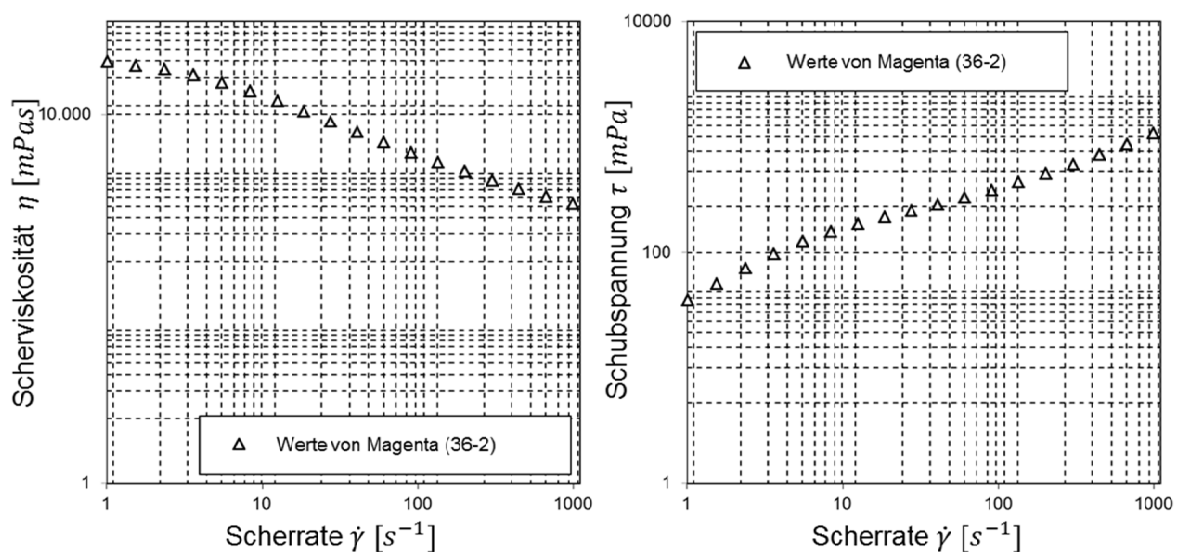


Abbildung 4.11: Darstellung der gemessenen Viskositäts- und Fließkurve von Magenta 36-2.

Bei den Viskositäts- und Fließkurven in Abbildung 4.11 wird ebenfalls vermutet, dass mit Zunahme der Scherrate die dispergierten Feststoffteilchen, die ebenfalls als Agglomerate vorliegen, weiter aufgebrochen werden. Grundsätzlich wird bei beiden UV-Farben ein strukturviskoses Verhalten erkannt. Magenta 39-6 nähert sich mit der Scherviskosität bei Zunahme der Scherrate einem Wert von ca. 700 *mPas* an. Bei Magenta 36-2 sinkt die Scherviskosität bis zu einer Scherrate von 1100 s⁻¹ auf einen Wert von ca. 1000 *mPas* ab. Damit man dies besser beobachten kann, wird in Abbildung 4.11 die logarithmische Form der Darstellung angewendet.

Das Trägermedium dieser beiden UV-Farben Magenta 39-6 und 36-2 ist ein Bindemittel. Dieses löst unter UV-Licht eine chemische Reaktion aus, welche die Farbe aushärtet. Hierbei handelt es sich bei Magenta 39-6 um eine radikalische Polymerisation (Acrylat), bei der die Druckfarbe bis zu ihrer vollständigen Aushärtung mit UV-Licht bestrahlt werden muss [ESC01], [SIE07_a], [TAF04]. Bei Magenta 36-2 entsteht die Aushärtung durch eine kationische Polymerisation (Epoxid). Diese benötigt nur einen kurzen Energieeintrag an UV-Licht, um eine reaktive Kettenfortpflanzung der Aushärtung zu starten [ESC01], [SIE07_b], [TAF04].

Als Ergebnisgrößen der Flüssigkeitscharakterisierung im vorliegenden Kapitel werden zwei Scherviskositäten η_{110} und η_{1100} bei den Scherraten $\dot{\gamma}$ bei 110 und 1100 s⁻¹ definiert. Dadurch werden die einzelnen Flüssigkeiten bei unterschiedlichen Scherraten miteinander vergleichbarer. Eine Übersicht der beiden Scherviskositäten η_{110} und η_{1100} zeigt Tabelle 4.3.

Bezeichnung	Nr.	Scherviskosität η_{110} [<i>mPas</i>]	Scherviskosität η_{1100} [<i>mPas</i>]
Wasser	1.	1,0	1,0
Glycerin	2.	453	453
Aqualabel Black 774083S	3.	898	375
Magenta 39-6 (Sicura Flex)	4.	1300	700
Magenta 36-2 (Sicura Flex)	5.	3000	1000

Tabelle 4.3: Auflistung der in dieser Arbeit verwendeten Flüssigkeiten und deren Scherviskositäten η_{110} und η_{1100} bei den Scherraten $\dot{\gamma}$ bei 110 und 1100 s⁻¹.

4.3 Charakterisierung der Benetzungseigenschaften

Eine weitere wichtige Betrachtung um Einflussgrößen im Druckprozess zu erkennen, ist die Untersuchung von Benetzungseigenschaften der Flüssigkeiten auf strukturierten Oberflächen. Hierzu wird der Kontaktwinkel von abgelegten Tropfen auf der Flexodruckform und die Oberflächenspannung der verwendeten Flüssigkeiten bestimmt.

4.3.1 Kontaktwinkelmessgerät

Die Kontaktwinkelmessungen wurden an dem Kontaktwinkelmessgerät KRÜSS DSA 100 der Firma Krüss durchgeführt (s. Abb. 4.12 (a)).

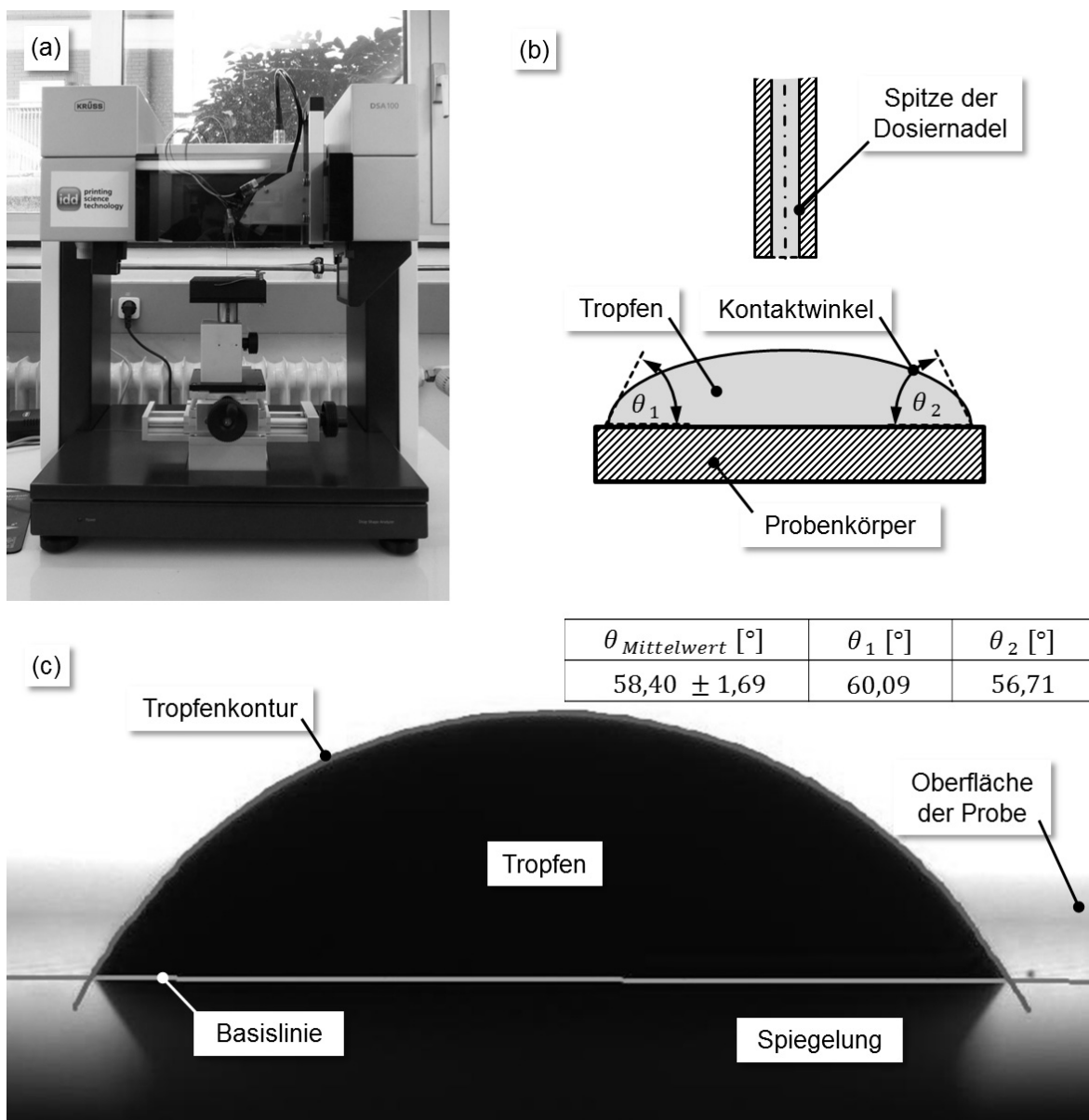


Abbildung 4.12: KRÜSS DSA 100 (a), schematische Darstellung der Kontaktwinkelmessung (b) und Livebild des Tropfenkontrasts (c).

Das Kontaktwinkelmessgerät dient der Tropfenkonturanalyse bzw. der Bestimmung des Kontaktwinkels von Flüssigkeiten auf Festkörperoberflächen und deren Oberflächenenergien wie Oberflächen- bzw. Grenzflächenspannung. Zur Bestimmung des Kontaktwinkels wird eine definierte Menge eines Flüssigkeitstropfens mit einer Nadel auf der Festkörperoberfläche abgelegt, was in Abbildung 4.12 (b) schematisch dargestellt ist. Das optische System des Kontaktwinkelmessgeräts nimmt den abgelegten Tropfen von der Seite mit einer monochromen Kamera und einem siebenfachen Zoom auf. Hierzu dient eine Hochleistungs-Variofeldbeleuchtung als Lichtquelle. Der Tropfen befindet sich dabei zwischen Lichtquelle und Kamera. Durch das Abheben von Tropfen und Festkörperoberfläche gegenüber dem umgebenden Luftmedium wird ein schwarz-weißer Kontrast erzielt (s. Abb. 4.12. (c)). Dieser Kontrast hilft der Auswertesoftware, den Kontaktwinkel zu bestimmen. In dieser Arbeit wird die „Sessile Drop“ (dt. liegender Tropfen) Methode angewandt. Hierzu legt der Bediener in der Auswertesoftware am Bildschirm eine „Baseline“ (dt. Basislinie) auf die Kontaktlinie des Tropfens zur Festkörperoberfläche. Dies dient der Fehlerinterpretation der Software bei einer Spiegelung von der Festkörperoberfläche, die in Abbildung 4.12 (c) ebenfalls zu sehen ist. Die Software bestimmt mithilfe der Ausgleichsrechnung (Fitting) die Tropfenkontur. Aus Basislinien und Tropfenkontur wird so der Kontaktwinkel ermittelt. Hierzu berechnet die Software beide Kontaktwinkel θ_1 , θ_2 zu einem Mittelwert $\theta_{\text{Mittelwert}}$ (s. Abb. 4.12. (b)). Um den Messfehler bei der Dosierung der Flüssigkeitsmenge zu reduzieren, werden jeweils fünf Tropfen nacheinander vermessen. Auch wird an jedem Tropfen der Kontaktwinkel θ_1 und θ_2 weitere fünfmal bestimmt. Mithilfe weiterer Auswertemethoden kann auch Oberflächen- bzw. Grenzflächenspannung bestimmt werden, die am Ende des vorliegenden Abschnitts genannt werden [KRÜ12], [ÜCÜ12].

4.3.2 Benetzungseigenschaften von Flüssigkeiten auf Oberflächen

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Benetzungseigenschaften der verwendeten Flüssigkeiten auf Druckformen untersucht. Es wird angenommen, dass die Rasterung der Druckform einen Einfluss auf den Kontaktwinkel hat. Untermauert wird dieser Ansatz durch eine ähnliche Untersuchung von BICO, TORDEUX & QUÉRÉ [BIC01], CHU, XIAO & WANG [CHU10] und MANUKYAN [MAN13] zu dieser Thematik.

Bei den folgenden Untersuchungen dieser Arbeit wird ein Tropfen mit einer definierten Flüssigkeitsmenge auf der Druckform abgelegt. Die Druckform wird gedreht und bei verschiedenen Ausrichtungen φ der Kontaktwinkel θ_φ des abgelegten Tropfens bestimmt. Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhangs dient Abbildung 4.13. In einer ersten Versuchsreihe wird untersucht, welchen Einfluss eine konstante Strukturierung der Flexodruckform auf verschiedene Flüssigkeiten hat.

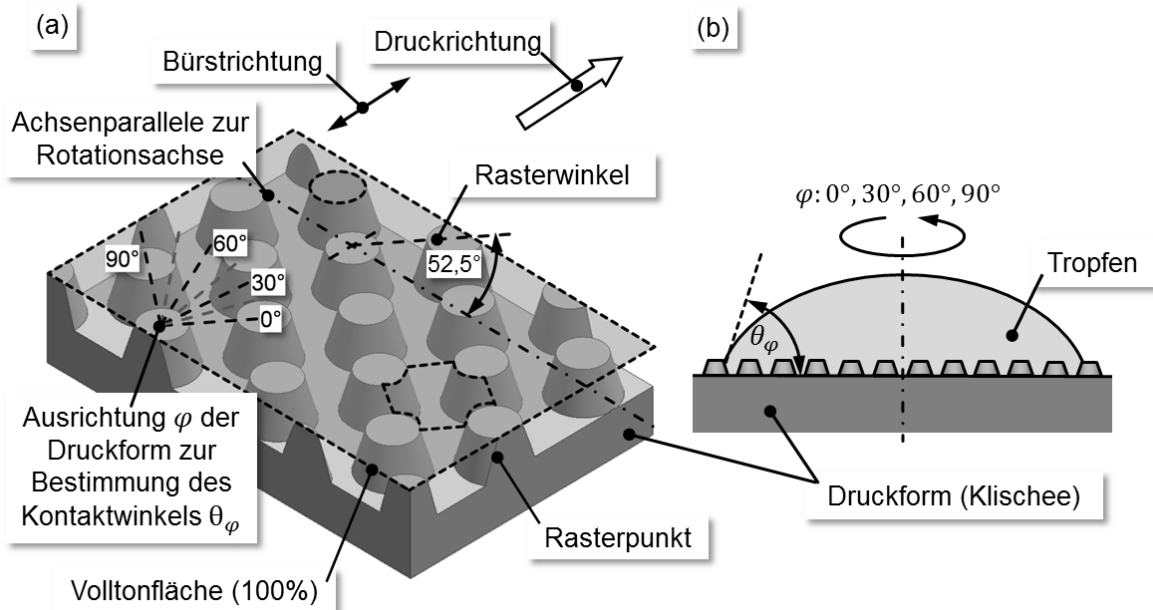


Abbildung 4.13: Schematische Darstellung der Ausrichtung der Flexodruckform (a) und die Kontaktwinkelmessung bei Drehung der Druckform (b).

Untersucht wird destilliertes Wasser, Glycerin und die Flexodruckfarbe Aqualabel Black. Die Flüssigkeitsmenge bleibt konstant bei $3 \mu\text{l}$. Die Druckform besitzt ein Raster von 48 Linien/cm und einen Ist-Tonwert von 42,15 %. Um den Verlauf des Kontaktwinkels um die Rotationsachse des Tropfens zu bestimmen, erfolgt die Ausrichtung in einem Bereich von 0° bis 90° . Bei der Drehung des Tropfens wird in Schritten von 15° der Kontaktwinkel θ_1, θ_2 gemessen. Die folgende Abbildung 4.14 (a) zeigt die Mittelwerte der Kontaktwinkel $\theta_{\text{Mittelwert}}$ bei einer Gesamtdrehung um 90° .

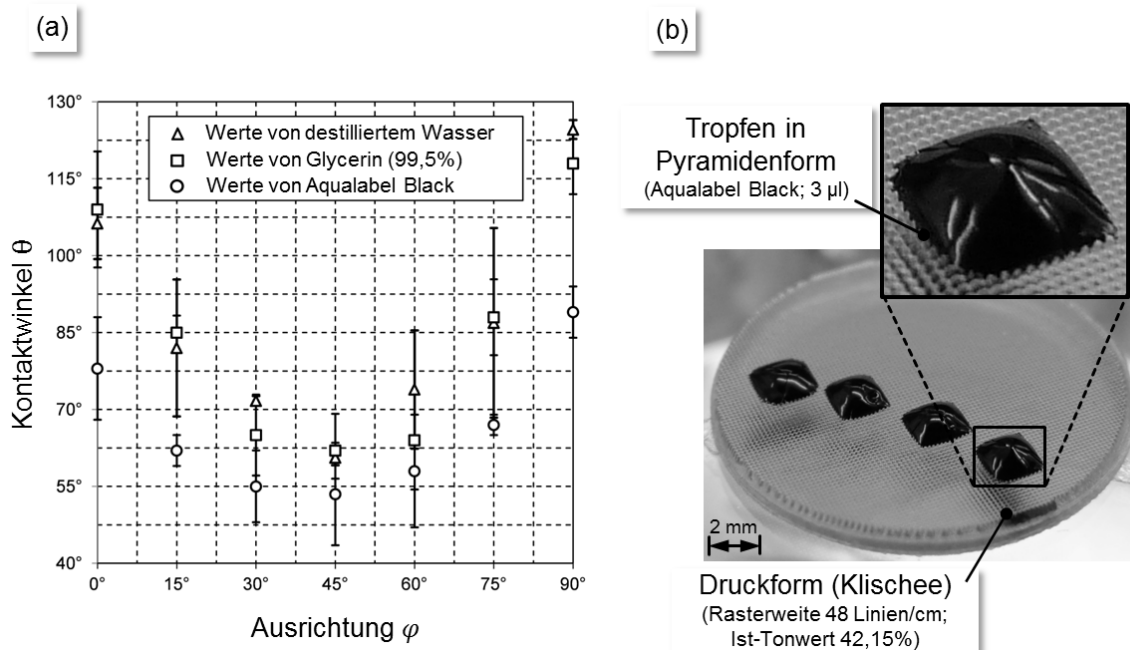


Abbildung 4.14: Darstellung des Kontaktwinkels bei einer Drehung um 90° für drei verschiedene Flüssigkeiten (a) und die Pyramidenform des Tropfens von Aqualabel Black (b).

Die Standardabweichung des Mittelwerts von zehn Messwerten des Kontaktwinkels in Abbildung 4.14 (a) liegen in einem Vertrauensbereich von 95 %. Anhand des gemessenen Kontaktwinkels und der Beobachtung der Tropfen aus der Draufsicht wird erkannt, dass alle drei Flüssigkeiten eine rechteckige Grundfläche annehmen. In Abbildung 4.14 (b) ist beispielhaft die Pyramidenform von Aqualabel Black gezeigt.

In einem folgenden Schritt wird untersucht, welchen Einfluss die Flüssigkeitsmenge auf den mittleren Kontaktwinkel $\theta_{\text{Mittelwert}}$ hat. Auch wird untersucht, welchen Einfluss ein unterschiedliches Raster bei gleichem Soll-Tonwert von 45 % hat. Abbildung 4.15 zeigt das Verhalten von Wasser bei den Flüssigkeitsmengen 1, 3 und 9 μl .

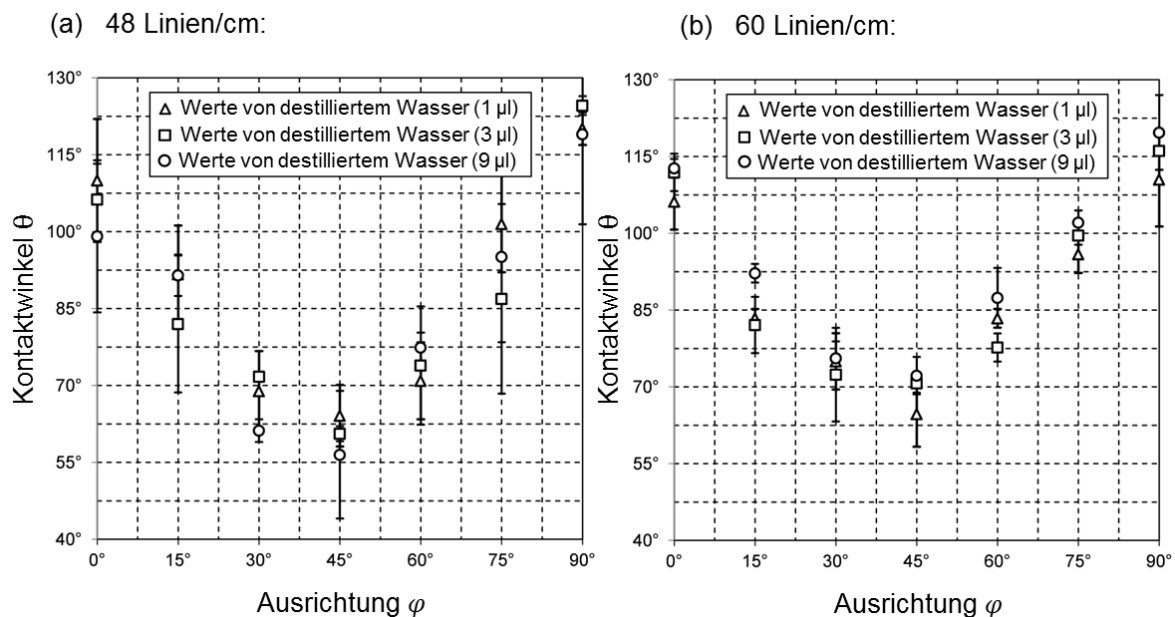


Abbildung 4.15: Darstellung des Kontaktwinkels von Wasser bei einem Tropfenvolumen von 1, 3, und 9 μl bei 48 Linien/cm (a) und 60 Linien/cm (b). Der Ist-Tonwert beträgt 42,15 % (a) und 42,75 % (b).

Bei der Zunahme der Flüssigkeitsmenge von destilliertem Wasser in Abbildung 4.15 zeigt sich eine Änderung des Kontaktwinkels bei der jeweiligen Ausrichtung φ . Vergleicht man den maximalen und den minimalen Kontaktwinkel bei 48 und 60 Linien/cm, so liegt bei einer Ausrichtung φ von 45° ein Unterschied von ca. 5° vor. Der Tropfen behält weiterhin seine rechteckige Grundfläche. Allerdings zeigt sich bei unterschiedlichen Rastern ein Unterschied zwischen dem Delta des minimalen und maximalen Kontaktwinkels. Auch wird deutlich, dass der maximale Kontaktwinkel bei beiden Rastern über 90° liegt. Dennoch wird der Tropfen von der Druckform so beeinflusst, dass er eine rechteckige Grundfläche ausbildet. Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhangs dient Abbildung 4.17 (a).

Die Ergebnisse bei der Untersuchung unterschiedlicher Flüssigkeitsmengen müssen mit Vorsicht betrachtet werden. Die Dreiphasenkontaktlinie des Tropfens kann beim Auftragen der Flüssigkeit mit der Dosiernadel bei einem bestimmten Flüssigkeitsvolumen auf der Oberfläche springen. Dieser Vorgang wird in der Literatur auch als Kontaktwinkel-

Hysterese bezeichnet [ERA12], [ROI12]. Die Kontaktwinkel-Hysterese wird in Kapitel 2.3.4 bezüglich des dynamischen Kontaktwinkels nur grundlagenlastig erklärt. In der Wissenschaft gibt es hier ein sehr großes Forschungsfeld, das sich nur mit dem Verhalten der Dreiphasenkontaktlinie und der Kontaktwinkel-Hysterese beschäftigt. Auf das Verhalten einer auftretenden Kontaktwinkel-Hysterese wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Viel mehr interessiert der Einfluss der strukturierten Festkörperoberfläche auf die Ausbildung der Tropfengeometrie.

Ein ähnliches Verhaltensmuster wie destilliertes Wasser zeigt Glycerin (*s. Abb. 4.16*). Hier zeigt sich ein ähnliches Verhalten bezüglich des Werts des maximalen Kontaktwinkels. Dabei bildet sich ebenfalls eine rechteckige Grundfläche aus (*s. Abb. 4.17 (b)*).

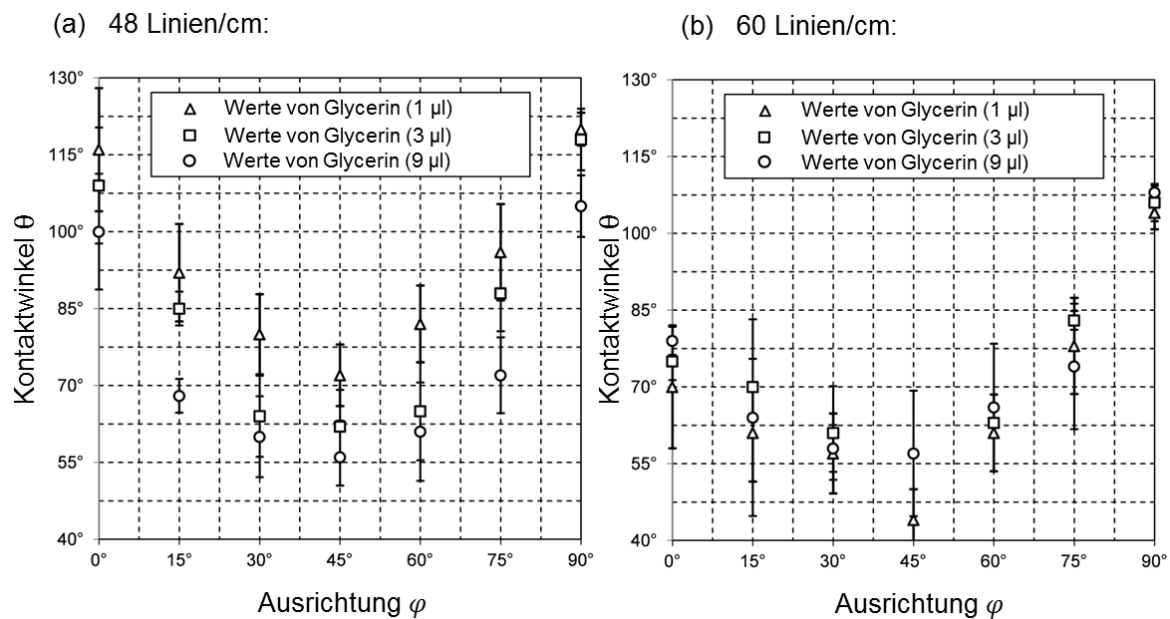


Abbildung 4.16: Darstellung des Kontaktwinkels von Glycerin bei einem Tropfenvolumen von 1,3, und 9 μl bei 48 Linien/cm (a) und 60 Linien/cm (b). Der Ist-Tonwert beträgt 42,15 % (a) und 42,75 % (b).

In Abbildung 4.16 (a) kommt es bei einem Raster von 48 Linien/cm mit Zunahme der Flüssigkeitsmenge zu einem Anstieg des Kontaktwinkels um ca. 15°. Dies kann die Folge einer Kontaktwinkel-Hysterese sein und an einem Sprung der Dreiphasenkontaktlinie liegen. Die Differenz zwischen größten und kleinsten Kontaktwinkeln bleibt allerdings konstant. Bei 60 Linien/cm in Abbildung 4.16 (b) zeigt sich mit Zunahme der Flüssigkeitsmenge eine relativ geringe Änderung des Kontaktwinkels von durchschnittlich 8°. Im Vergleich zu dem Raster mit 48 Linien/cm ist der Kontaktwinkel grundsätzlich kleiner, was dafür spricht, dass hier möglicherweise eine höhere Adhäsionswirkung vorliegt. Abbildung 4.17 zeigt einen Wasser- und Glycerin-Tropfen mit einem Volumen von 3 μl auf der Flexodruckform. Hierbei entsteht ein Phänomen, das bisher in keiner gesichteten Literatur beschrieben wird. Die Grundfläche der Tropfen ist rechteckig und es ist der Ansatz einer Pyramidenform zu erkennen. Die restliche Form der Tropfen zeigt die Merkmale einer typischen Krümmung. Auf den Tropfen wirkt bei der Unterschreitung der

Kapillarlänge (bei Wasser ca. 2 mm) eine vernachlässigbar kleine Schwerkraft, die keinen Einfluss auf die Tropfenform nimmt. Es wird daher vermutet, dass hier bei beiden Flüssigkeiten (Wasser und Glycerin) dieser Übergangsbereich vorliegt. Möglicherweise wirken hier der hydrostatische Druck und die Oberflächenspannung, die in Kombination mit der Oberflächenstrukturierung der Druckform die geometrische Ausbildung der Tropfen beeinflussen (s. Abb. 4.17).

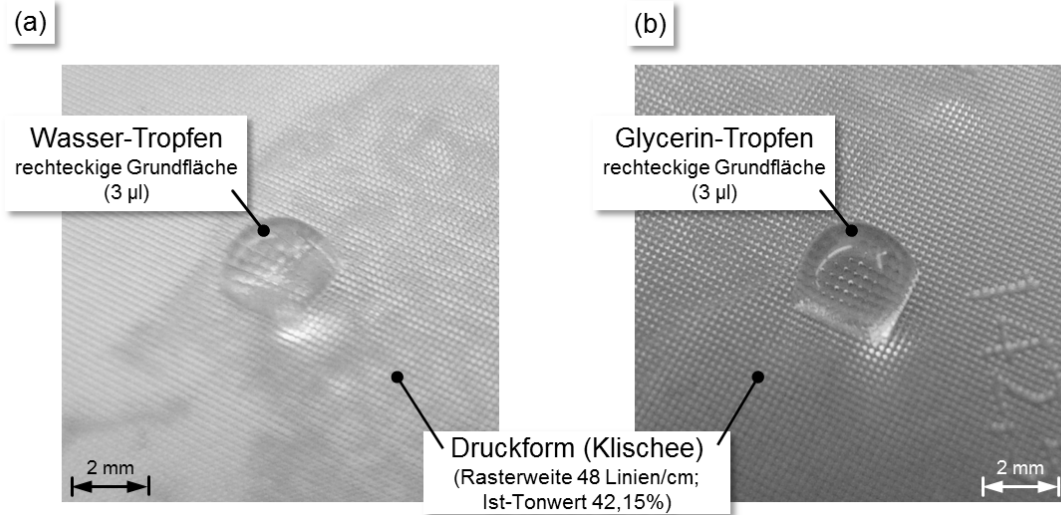


Abbildung 4.17: Darstellung von Wasser-Tropfen (a) und Glycerin-Tropfen (b) auf einer Flexodruckform.

Ein anderes Verhalten zu den Tropfen in Abbildung 4.17, was schon in Abbildung 4.14 gezeigt wird, ist die Pyramidenform von der Flexodruckfarbe Aqualabel Black. Abbildung 4.18 zeigt diese Farbe bei Zunahme des Tropfenvolumens von 3 auf 9 μl und den Einfluss der Rasterung auf den jeweiligen Kontaktwinkel in Abhängigkeit der Ausrichtung.

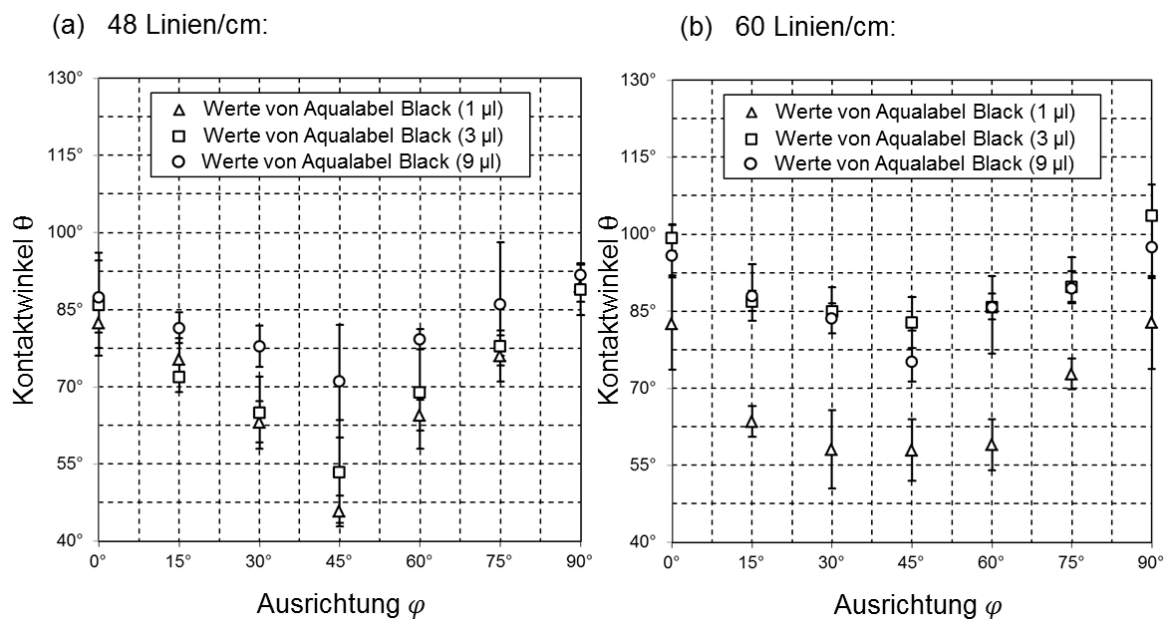


Abbildung 4.18: Darstellung des Kontaktwinkels von Aqualabel Black bei 1, 3, und 9 μl bei 48 Linien/cm (a) und 60 Linien/cm (b). Der Ist-Tonwert beträgt bei 42,15 % (a) und 42,75 % (b).

Es wird erkannt, dass bei einer Rasterung von 48 Linien/cm und $9\ \mu\text{l}$ (s. Abb. 4.18 (a)) die Differenz des kleinsten Kontaktwinkels zum Größten am stärksten ausfällt und hier die Pyramidenform des Tropfens bestehen bleibt. Bei den Untersuchungen zeigt sich grundsätzlich bei einem Raster von 48 Linien/cm eine stärker ausgeprägte Tendenz zur rechteckigen Grundfläche als bei 60 Linie/cm. Bei einem Raster mit 60 Linien/cm in Abbildung 4.18 (b) zeigt sich mit Zunahme der Flüssigkeitsmenge ein Aufblähen des Tropfens bei ruhender Dreiphasenkontaktlinie. Gleichzeitig ist die Differenz zwischen größtem und kleinstem Kontaktwinkel im Vergleich zu 48 Linien/cm relativ klein. Es liegt gleichzeitig eine Zwischenform aus rechteckiger und rotationssymmetrischer Kontaktfläche des Tropfens vor.

Die Abbildungen 4.14, 4.15, 4.16 und 4.18 zeigen den Kontaktwinkel θ in Abhängigkeit der Ausrichtung φ . Zur besseren Darstellung wird der größte Kontaktwinkel immer bei 90° aufgetragen. Dies dient der Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Raster. Bei mehrfacher Wiederholung der Messungen des Kontaktwinkels ergaben sich Messfehler bei der Ausrichtung φ von 0° und 90° . Dies kann unterschiedlichste Ursachen haben. Es wird vermutet, dass eine leicht schräg ausgerichtete Dosieradel die Geometrie des Tropfens beeinflusst. Auch ist zu diskutieren, ob es bei der Herstellung der Druckform zu einer richtungsabhängigen Vernetzung der Polymere kommt. Dies hat eventuell einen Einfluss auf das Benetzungsverhalten und den Kontaktwinkel.

Die bisher in diesem Abschnitt genannten Flüssigkeiten wie Wasser, Glycerin und Aqualabel Black wurden auch bei unterschiedlichen Tonwerten untersucht. Dabei zeigt sich unter Betrachtung des größten vorliegenden Kontaktwinkels bei Zunahme des Ist-Tonwerts folgender Zusammenhang (s. Abb. 4.19).

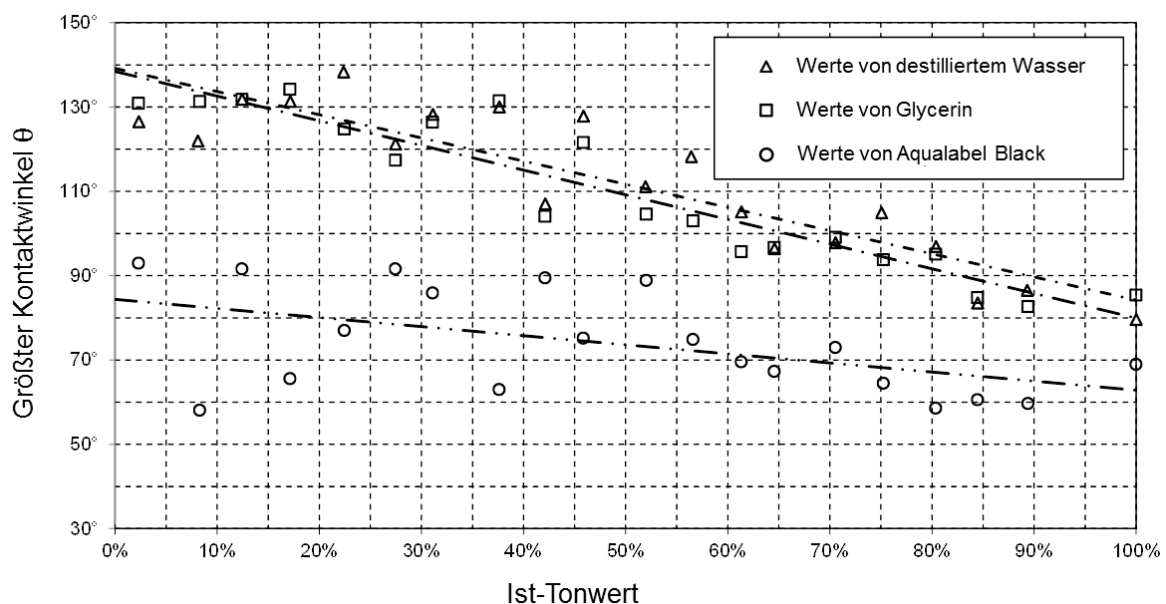


Abbildung 4.19: Darstellung des größten Kontaktwinkels über dem Ist-Tonwert bei 48Linien/cm und einem Tropfenvolumen von $3\ \mu\text{l}$.

Mit Zunahme des Ist-Tonwerts in Abbildung 4.19 gibt es eine Abnahme des größten Kontaktwinkels, der durch die Trendlinien veranschaulicht wird. Es zeigt sich, dass die Newton'schen Flüssigkeiten (Wasser und Glycerin) bei dem jeweiligen Ist-Tonwert einen ähnlich großen Kontaktwinkel besitzen. Nach dem Verlauf der Trendlinien nimmt der größte Kontaktwinkel der drei untersuchten Flüssigkeiten (Wasser, Glycerin und Aqualabel Black) mit Zunahme des Ist-Tonwerts grundsätzlich ab. Hier zeigt sich bei Wasser und Glycerin ein nahezu identischer Verlauf der Trendlinien. Betrachtet man die Schwankung des größten Kontaktwinkels bei der Zunahme des Ist-Tonwerts, so zeigt sich bei Wasser und Glycerin ebenfalls ein nahezu identisches Verhalten. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts sind die Fehlerbalken in Abbildung 4.19 nicht eingezeichnet. Bei den Newton'schen Flüssigkeiten zeigt sich immer die gleiche Kontaktwinkelschwankung über dem Tonwert, wohingegen Aqualabel Black eine eher gegenläufige Schwankung des Kontaktwinkels zu den Newton'schen Flüssigkeiten erkennen lässt.

Betrachtet man den kleinsten Kontaktwinkel über dem Ist-Tonwert der Flüssigkeiten Wasser und Glycerin (s. Abb. 4.20), so zeigt sich ein ähnliches Verhalten, wie schon bei der Darstellung des größten Kontaktwinkels (s. Abb. 4.19), was den grundsätzlichen Verlauf der Trendlinien angeht. Aqualabel Black zeigt dagegen einen Anstieg bezüglich des Verlaufs der Trendlinie des kleinsten Kontaktwinkels. Die Kontaktwinkelschwankung von Aqualabel Black zeigt auch hier ein gegenläufiges Verhalten zu den Newton'schen Flüssigkeiten. Auch zeigt Aqualabel Black, was die Trendlinie angeht, einen Anstieg des kleinsten Kontaktwinkels.

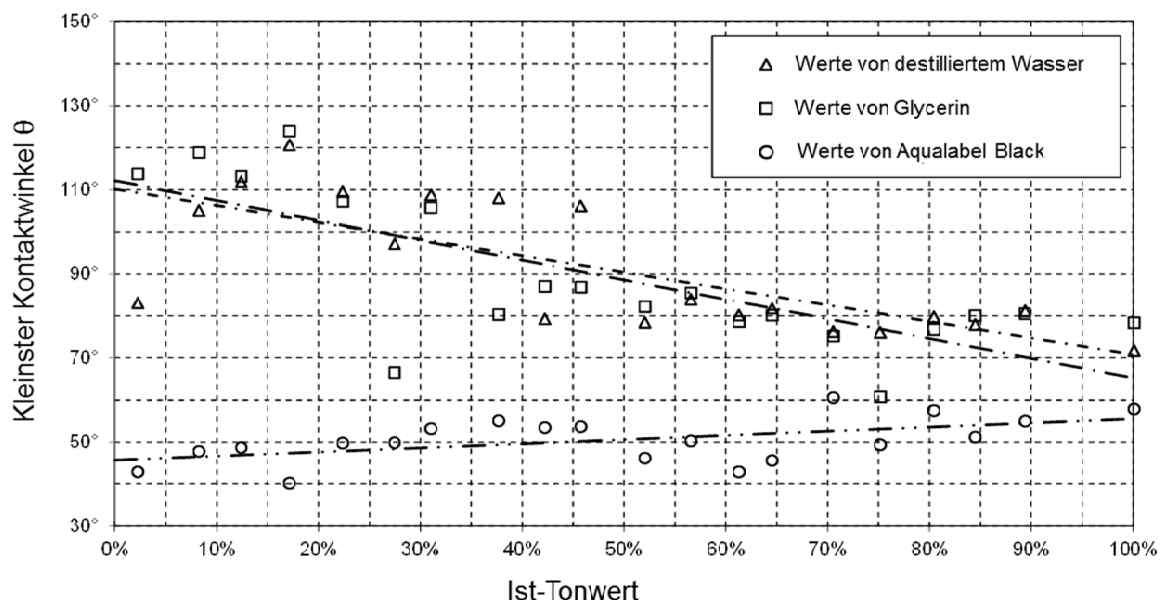


Abbildung 4.20: Darstellung des kleinsten Kontaktwinkels über dem Ist-Tonwert bei 48Linien/cm und einem Tropfenvolumen von 3 μ l.

Bei den Newton'schen Flüssigkeiten in Abbildung 4.20 wird gezeigt, dass mit Zunahme des Ist-Tonwerts und der Verringerung der Vertiefungen der Druckform (s. Abb. 4.2) der Kontaktwinkel abnimmt.

In Abbildung 4.21 ist der größte und kleinste Kontaktwinkel von Aqualabel Black über dem Ist-Tonwert aufgetragen. Im direkten Vergleich des größten und kleinsten Kontaktwinkels ist zu erkennen, dass die Trendlinien mit Zunahme des Ist-Tonwerts zusammenlaufen.

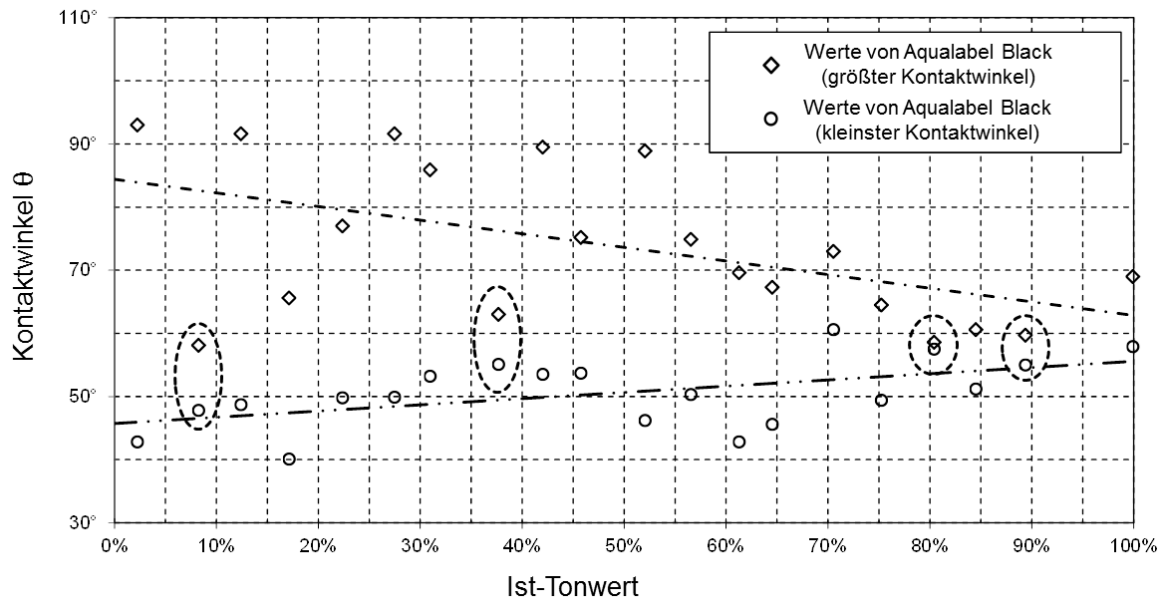


Abbildung 4.21: Darstellung des größten und kleinsten Kontaktwinkels von Aqualabel Black über dem Ist-Tonwert bei 48 Linien/cm und einem Tropfenvolumen von $3\mu\text{l}$.

Es zeigt sich in Abbildung 4.21, dass bei bestimmten Ist-Tonwerten der größte und der kleinste Kontaktwinkel (s. Kreise in Abb. 4.21) nahezu gleich sind und somit ein Trend zum rotationssymmetrischen Tropfen vorliegt. Dies kommt bei einem Ist-Tonwert von 8,22 %, 31,08 % und von 64,58 bis 100 % vor. Ebenfalls wird dieses Verhalten bei den Messungen direkt beobachtet.

Die Untersuchungen des Kontaktwinkels zeigen, dass die Änderung des Ist-Tonwerts und die daraus resultierende Änderung der Oberflächenstrukturierung einen Einfluss auf das Benetzungsverhalten des Tropfens haben. Welche Einflussgrößen dabei eine Rolle spielen, konnte nicht festgestellt werden. Mögliche Einflussgrößen können neben der Oberflächenstrukturierung das Ausbürsten der Druckform bei der Herstellung sein. Dabei werden kleine Riefen in die Druckform eingebracht. Auch ist unklar ob Lufteinschlüsse zwischen dem Tropfen und der Druckform vorliegen. Bei genauerer Betrachtung der Oberflächenstrukturierung ist der Abstand der Rasterlinien zueinander und deren Einfluss nicht bekannt, was in der Arbeit von EXTRAND [EXT02] beschrieben wird. Weiterhin ist unklar, wie sich die Flüssigkeit bei einer bestimmten Oberflächenstrukturierung verhält,

wie die Untersuchungen von HERMINGHAUS, BRINKMANN & SEEMANN [HER08] und GAO, MCCARTHY & ZHANG [GAO09] zeigen.

Die bisher gezeigten Versuchsergebnisse sind nur ein kleiner Teil von über 1400 Kontaktwinkelmessungen auf strukturierten Oberflächen. Ein grundsätzlich anderes Verhalten als Wasser, Glycerin und Aqualabel Black zeigen die in dieser Arbeit verwendeten UV-Farben, welche in den folgenden Abschnitten behandelt werden.

Die verwendeten UV-Farben Magenta 39-6 und Magenta 36-2 zeigen bei Auftragen auf die Druckform eine rotationssymmetrische Kontaktfläche. Es wird daher die Annahme getroffen, dass die Oberflächenstrukturierung der Druckform keinen Einfluss auf die UV-Farben hat. Hierzu werden neben den bisher genannten Kontaktwinkelmessungen auch Untersuchungen zur Bestimmung der Oberflächenspannung durchgeführt. Tabelle 4.4 zeigt die Oberflächenspannungen der einzelnen Flüssigkeiten sowie deren polarer und disperser Anteil.

Bezeichnung	Nr.	Oberflächenspannung σ_L [mN/m]	σ_L^p	σ_L^d
Wasser	1.	72,6	37,71	34,89
Glycerin	2.	66,86	4,98	61,88
Aqualabel Black 774083S	3.	nicht messbar	---	---
Magenta 39-6 (Sicura Flex)	4.	14,65	11,78	2,87
Magenta 36-2 (Sicura Flex)	5.	28,09	14,10	13,99

Tabelle 4.4: Auflistung der in dieser Arbeit verwendeten Flüssigkeiten und deren Oberflächenspannung σ_L und deren polarer σ_L^p und disperser Anteil σ_L^d .

Zur Bestimmung der Oberflächenspannung σ_L in Tabelle 4.4 wird die Methode des hängenden Tropfens (engl. hanging drop methode) am KRÜSS DAS 100 angewandt. In einem weiteren Schritt erfolgt die Methode nach OWRK (siehe Kapitel 2.3.4) zur Bestimmung des polaren und dispersen Anteils. Dabei wird ein Tropfen auf einer hydraulisch glatten Teflonoberfläche abgelegt. Die Auswertemethodik des KRÜSS muss bei komplexen Flüssigkeiten kritisch betrachtet werden, da nicht für jede Flüssigkeit eine Absolutaussage getroffen werden kann. Bei der Farbe Aqualabel Black ist aufgrund von Trocknungsvorgängen und die ständige Änderung der Konzentration keine Aussage bezüglich der Oberflächenspannung möglich.

Die UV-Farben zeigen bei den Kontaktwinkelmessungen und der Änderung der Ausrichtung φ um 90° einen relativ konstanten Kontaktwinkel θ_φ . Abbildung 4.22 (a) zeigt den Kontaktwinkel von Magenta 39-6 über der Ausrichtung φ aufgetragen.

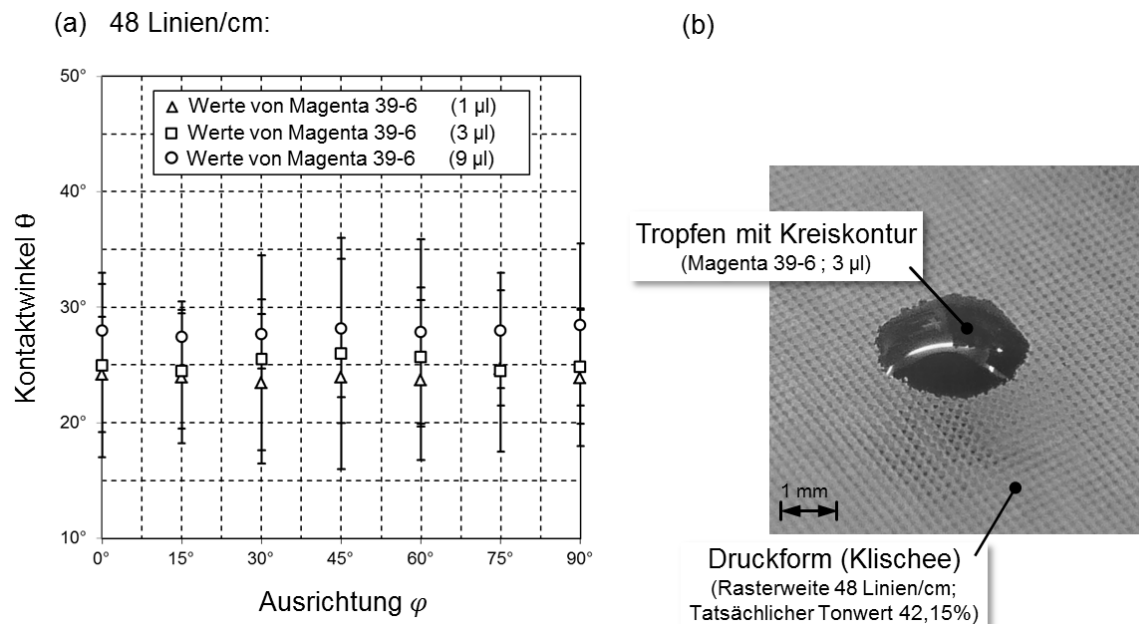


Abbildung 4.22: Darstellung des Kontaktwinkels von Magenta 39-6 bei einem Tropfenvolumen von 1,3, und 9 μ l bei 48 Linien/cm (a) und der Tropfen auf der Flexodruckform mit einem Ist-Tonwert von 42,15 % (b).

Der Tropfen selbst zeigt in Abbildung 4.22 (b) bei 3 μ l eine rotationssymmetrische Kontaktfläche. Bei Variation der Flüssigkeitsmenge wird bei der Kontaktfläche ebenfalls keine Änderung der Rotationssymmetrie festgestellt. Dieses Verhalten wird auch bei anderen Ist-Tonwerten beobachtet. Bei der Farbe Magenta 36-2 in Abbildung 4.23 (b) zeigt sich ein ähnliches Verhalten.

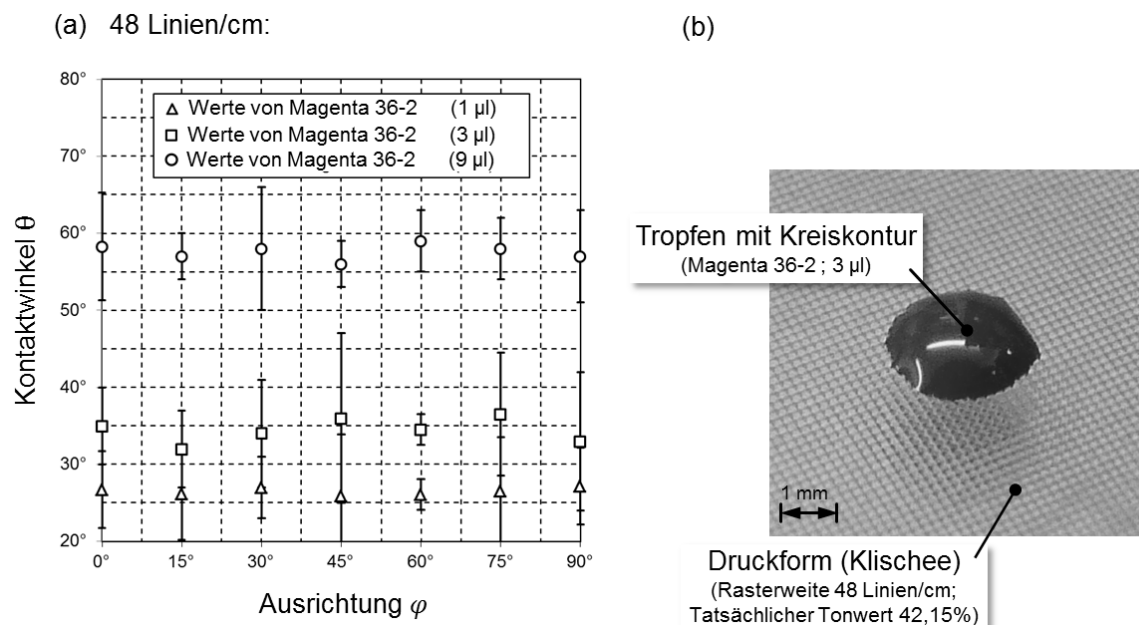


Abbildung 4.23: Darstellung des Kontaktwinkels von Magenta 36-2 bei einem Tropfenvolumen von 1,3, und 9 μ l bei 48 Linien/cm (a) und der Tropfen auf der Flexodruckform mit einem Ist-Tonwert von 42,15 % (b).

In Abbildung 4.23 wird erkannt, dass mit Zunahme der Flüssigkeitsmenge der Kontaktwinkel springt, was auf eine Kontaktwinkel-Hysterese schließen lässt. Vergleicht man bei den Farben Magenta 39-6 und 36-2 den Kontaktwinkel bei gleichem

Flüssigkeitsvolumen von 3 μl , dann fällt auf, dass bei Magenta 39-6 der Kontaktwinkel ca. 10° kleiner ist. Zieht man hierzu die Daten der gemessenen Oberflächenspannung heran, so wird deutlich, dass mit einer niedrigeren Oberflächenspannung des Tropfens, der Kontaktwinkel kleiner wird. Es wird daher vermutet, dass hier die Oberflächenspannung der Farbe den größten Einfluss auf das Benetzungsverhalten des Tropfens hat und nicht die Oberflächenstrukturierung und Grenzflächenspannung.

Bei den folgenden experimentellen Versuchen zur Farbspaltung werden in dieser Arbeit hauptsächlich die Ergebnisse der UV-Farben Magenta 39-6 und 36-2 vorgestellt. Gründe hierfür sind erstens, dass die UV-Farben über der Zeit nicht eintrocknen. Dadurch kann näherungsweise angenommen werden, dass die rheologischen Größen konstant vorliegen. Zweitens zeigen die UV-Farben im statischen Fall als Tropfen auf der Druckform keine Beeinflussung der Oberflächenstrukturierung. Dies kann sich in einem dynamischen Strömungsvorgang wiederum ganz anders darstellen. Da die experimentellen Versuche der Farbspaltung aus einer statischen Ausgangssituation starten, ist es von Vorteil, mögliche Einflussgrößen, die im statischen Fall vorliegen, zu reduzieren. Diese Einflussgrößen liegen bei den UV-Farben nicht vor. Die Untersuchung der UV-Farben ist daher für die wissenschaftliche Untersuchung der Farbspaltung von großem Interesse.

Bei den experimentellen Versuchen zur Farbspaltung wird als Substrat eine Glasoberfläche verwendet. Somit entsteht die Farbspaltung zwischen der Flexodruckform und der Glasoberfläche. Zur Vollständigkeit der Benetzungseigenschaften der verwendeten Flüssigkeiten wird der statische Kontaktwinkel auf Glas bestimmt. Tabelle 4.5 zeigt den Kontaktwinkel bei den in der Farbspaltung angewandten Farben.

Bezeichnung	Nr.	Kontaktwinkel θ [°] auf Glas
Wasser	1.	10
Glycerin	2.	28,8
Aqualabel Black 774083S	3.	---
Magenta 39-6 (Sicura Flex)	4.	35,8
Magenta 36-2 (Sicura Flex)	5.	46,9

Tabelle 4.5: Auflistung der untersuchten Flüssigkeiten und deren Kontaktwinkel bei 3 μl auf Glasoberfläche.

Aqualabel Black wird bei den weiteren experimentellen Versuchen der Farbspaltung nicht mehr angewandt und ist daher in Tabelle 4.5 nicht untersucht. Die Farbe trocknet vor Versuchsbeginn ein. Im folgenden Kapitel wird der experimentelle Versuchsaufbau zur Untersuchung der Farbspaltung vorgestellt.

5. Experimentelle Untersuchung zur Farbspaltung

Damit man die Farbspaltung in der Druckmaschine besser verstehen kann, wird in dieser Arbeit auf einen vereinfachten experimentellen Versuchsaufbau zurückgegriffen. Dadurch lässt sich die Vielzahl an Einflussgrößen, die im Druckspalt auf die Farbspaltung einwirken, reduzieren.

Im vorliegenden Kapitel wird der Versuchsaufbau dieser Arbeit vorgestellt. Hierzu wird auf einzelne Komponenten sowie deren Funktion und Zusammenwirken eingegangen. Auch wird gezeigt, wie sich der Versuchsaufbau durch Vorversuche empirisch weiterentwickelt hat und welche Erkenntnisse sich dabei ergeben haben.

5.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau beruht grundsätzlich auf der parallelen Plattenseparation zweier Oberflächen, zwischen denen eine Flüssigkeit dynamisch auseinandergezogen wird. Hierzu wird ein Dehnrheometer mit einem optischen System und einer Highspeed-Kamera erweitert, um das Filament und den Filamentabriss zu beobachten. In Abbildung 5.1 ist der experimentelle Versuchsaufbau dargestellt.

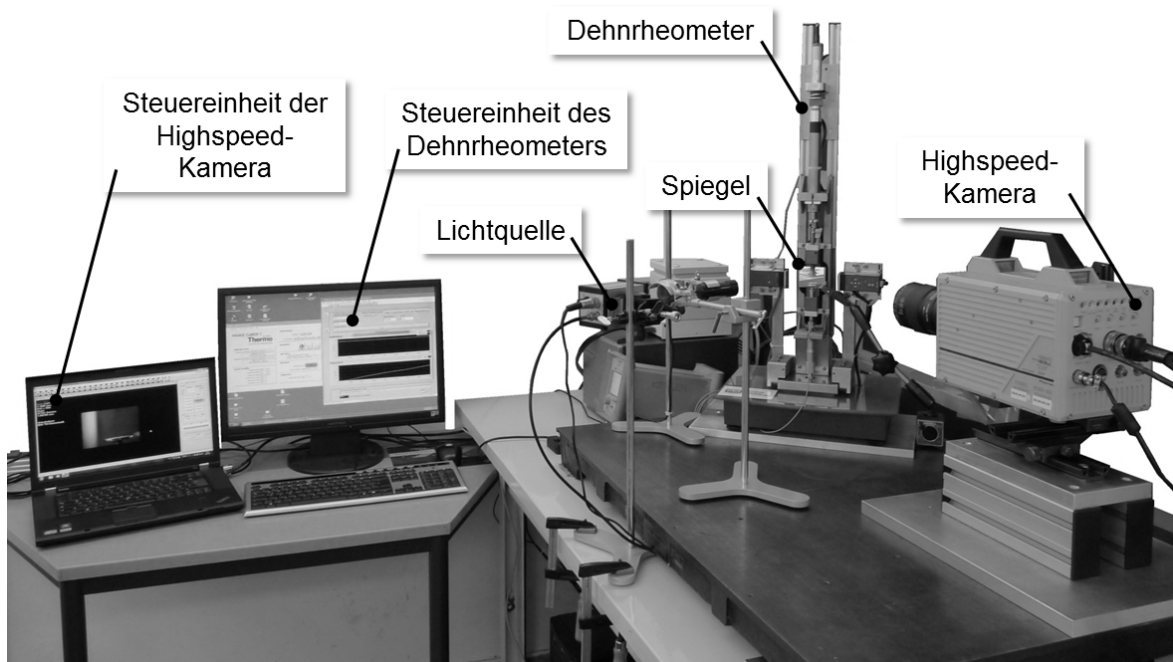


Abbildung 5.1: Darstellung des gesamten experimentellen Versuchsaufbaus zur Farbspaltung.

Abbildung 5.1 zeigt neben dem Dehnrheometer und der Highspeed-Kamera auch Teile des optischen Systems wie Lichtquelle und Spiegel. Auch werden die Steuereinheiten des Dehnrheometers und der Highspeed-Kamera dargestellt. Bei dem Dehnrheometer umfasst die Steuereinheit einen Computer mit der Rheometer-Software (HAAKE CaBER Control V4.50 / 11-29-04) von der Firma Thermo Fisher. Die Steuerung der Highspeed-Kamera

erfolgt über einen Laptop mit der Kamera-Software (Photron FASTCAM Viewer Version 3.2.8 / February 2011) der Firma Photron.

Betrachtet man neben den Steuereinheiten den eigentlichen Versuchsaufbau genauer (s. Abb. 5.2), werden noch weitere Komponenten zur Versuchsdurchführung ersichtlich.

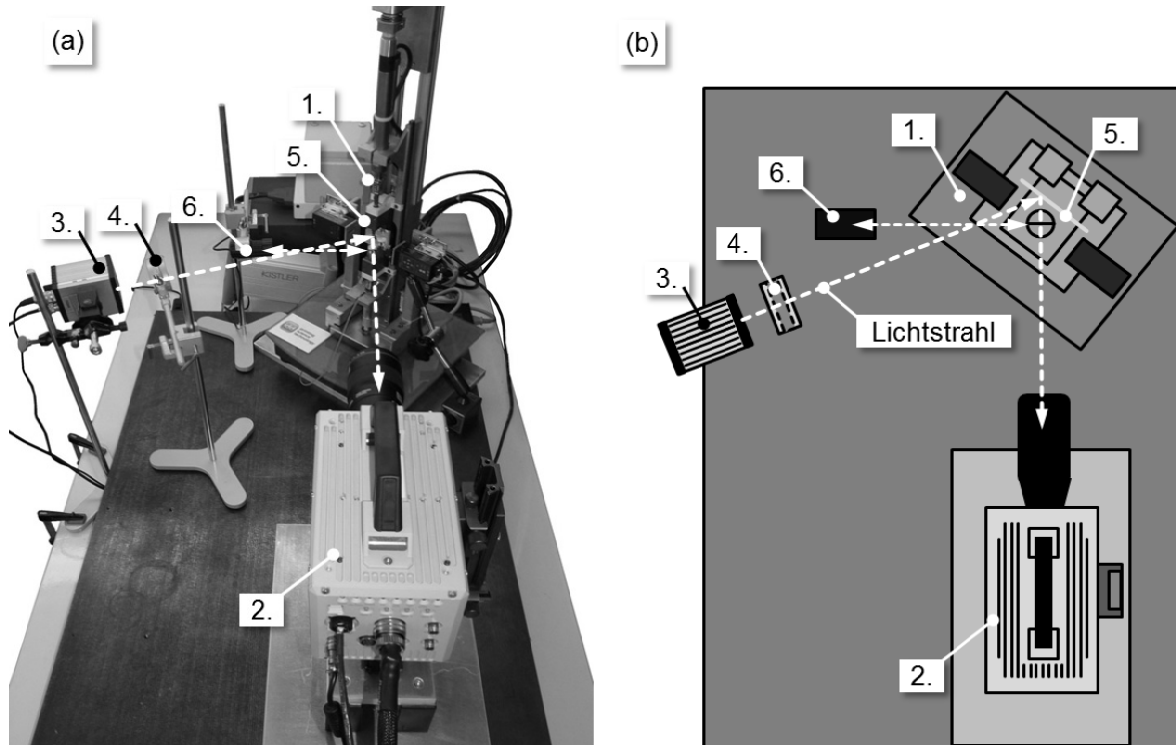


Abbildung 5.2: Darstellung des eigentlichen Versuchsaufbaus zur Farbspaltung von der Seite (a) und dessen schematische Draufsicht (b).

Abbildung 5.2 zeigt das gesamte optische System. Die gestrichelten weißen Linien stellen die erzeugten Lichtstrahlen dar. Diese werden von der StrobeLED und der Ring-Lichtquelle der USB-Kamera erzeugt. Eine Übersicht der einzelnen Komponenten und deren genaue Bezeichnung zeigt Tabelle 5.1.

Nr.	Überbegriff	Hersteller/ Vertrieb	Bezeichnung
1.	Dehnrheometer	Thermo Fisher	HAAKE CaBER
2.	Highspeed-Kamera	Photron	Fastcam SA 4
3.	Lichtquelle	MAK Bildtechnik	StrobeLED
4.	Blaufilter	Edmund Industrial Optics	Blue Dichroic Filter NT52-532
5.	Spiegel	Präzisions Glas & Optik	Planspiegel SEA-VIS
6.	USB-Kamera	BASETech	PC 3315

Tabelle 5.1: Darstellung der Komponenten des Versuchsaufbaus zur Farbspaltung.

Abbildung 5.2 zeigt den Verlauf des Lichtstrahls, der durch die Lichtquelle (StrobeLED) erzeugt wird. Der Lichtstrahl durchläuft den Blaufilter (Blue Dichroit Filter NT52-532)

und wird an dem Planspiegel (SEA-VIS) reflektiert. Das Licht wird durch den Planspiegel (SEA-VIS) gezielt reflektiert bzw. umgelenkt. Dadurch wird das entstehende Filament der Flüssigkeit direkt beleuchtet. Das reflektierte Licht, die Fokusebene des Filaments und die Highspeed-Kamera (Fastcam SA 4) liegen auf einer optischen Achse. Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhangs dient eine nähere Betrachtung des Dehnrheometers HAAKE CaBER in Abbildung 5.3 (a). Der Lichtstrahl wird von dem Planspiegel (SEA-VIS) reflektiert und an dem Filament der Flüssigkeit gebrochen. Dadurch ergibt sich zu dem Umgebungsmedium Luft ein Kontrast, der mit der monochromen Highspeed-Kamera erfasst wird.

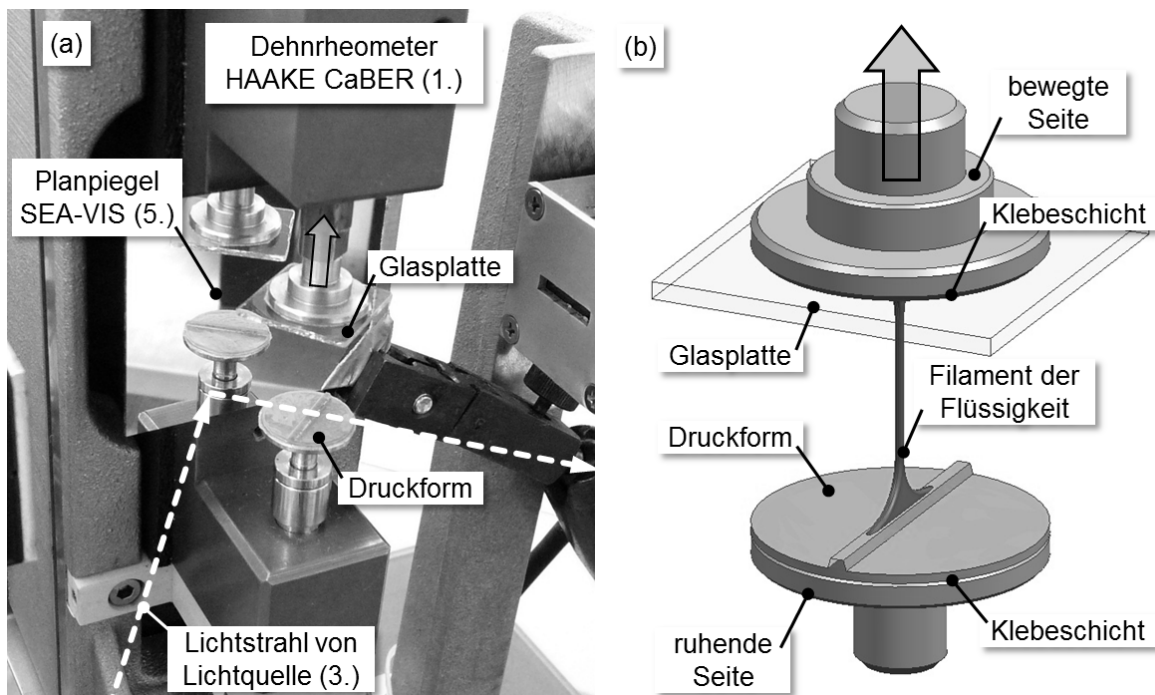


Abbildung 5.3: Darstellung des Arbeitsraums des Dehnrheometers HAAKE CaBER mit dem Lichtverlauf ohne Flüssigkeit (a) und der schematische Aufbau der Plattenseparation und einer dazwischen befindlichen Flüssigkeit (b).

In Abbildung 5.3 (b) ist der Aufbau der parallelen Plattenseparation dargestellt. Die untere Platte ruht, während sich die obere Platte bei der Versuchsdurchführung von der unteren Platte weg bewegt und dadurch ein Filament ausbildet. Auf der unteren Platte wird die Druckform mit einer Klebeschicht befestigt. Die Druckform zeigt sich als rotationssymmetrische nicht druckende Fläche mit einem schmalen erhabenen und druckenden Steg (Linienkontakt) in der Mitte. Auf diesen Sachverhalt wird noch genauer eingegangen. Auf der bewegten Platte ist mit einer Klebeschicht eine Glasplatte befestigt. Zwischen Druckform und Glasplatte wird in Abbildung 5.3 (b) schematisch der Vorgang der Filamentbildung und Farbspaltung gezeigt. Diese schematische Darstellung dient nur der Veranschaulichung des experimentellen Versuchsaufbaus. Was die Filamentausbildung angeht, können in der Versuchsanordnung aus Abbildung 5.3 (b) ganz unterschiedliche Phänomene entstehen, auf die in Kapitel 6 eingegangen wird.

5.1.1 Dehnrheometer HAAKE CaBER

Das HAAKE CaBER ist ein Dehnrheometer (engl. Extensional Rheometer) der Firma Thermo Fisher. Wie schon in Kapitel 2.4.4 erwähnt, wird das CaBER dazu verwendet, um die Fließeigenschaften von viskosen und niederviskosen Flüssigkeiten (von $0,01 \text{ Pas}$ bis 1000 Pas) im Dehnungszustand zu charakterisieren. Hierbei wird in der Standardausführung ein Flüssigkeitstropfen $< 0,2 \text{ ml}$ durch Separation zweier Platten (Durchmesser $5,9 \text{ mm}$) auseinandergezogen. Dabei wird gleichzeitig der Durchmesser des sich bildenden Filaments mit einem Lasersystem gemessen. Aus der daraus resultierenden Funktion des Filamentdurchmessers und der Kenntnis der Oberflächenspannung der Flüssigkeit kann die Dehnaviskosität ermittelt werden. Die obere Platte wird bei der Separationsbewegung bewegt, während die untere Platte fest ist und stehen bleibt. Diese wird in dieser Arbeit auch als die ruhende Seite bezeichnet. Die Antriebsbewegung in axiale Richtung der oberen Platte wird durch einen Linearmotor der Firma LinMot umgesetzt.

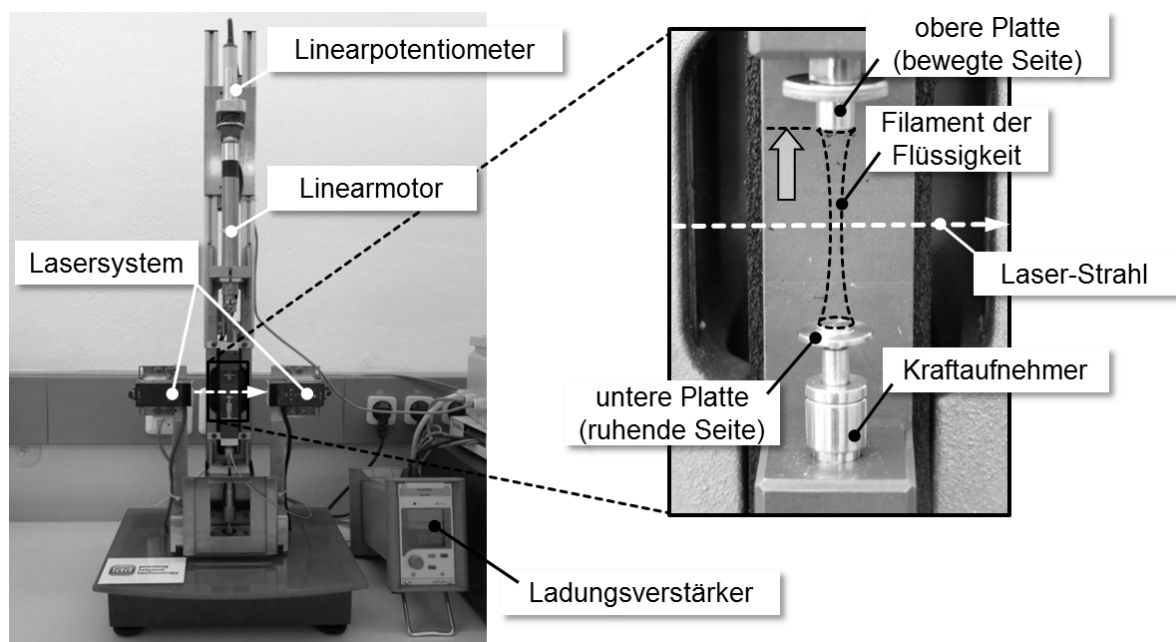


Abbildung 5.4: Darstellung des HAAKE CaBER in seiner Funktion als Dehnrheometer in der erweiterten Ausführung mit Kraftaufnehmer.

In der verwendeten Ausführung wurde das HAAKE CaBER mit einem Kraftaufnehmer (hochempfindlicher Piezosensor 9215) und Ladungsverstärker der Firma Kistler durch das IDD erweitert. Auch wurde es mit einem Linearpotentiometer der Firma Gefran zur Bestimmung der Position und der Software LabVIEW der Firma National Instruments zur Datenauswertung ergänzt. Tabelle 5.2 zeigt die Spezifikationen des Dehnrheometers in der erweiterten Ausstattung mit Kraft- und Wegmessung [INS12], [THE03], [THE09].

Spezifikationen	Wert/e (-Bereich)	Einheit
Plattendurchmesser	$4 < D_{\text{Platte}} < 8$	mm
Flüssigkeitsvolumen der Probe	$< 0,2$	ml
Scherviskosität	10 bis 10^6	mPas
Temperatur	0 bis 80	°C
Lasermikrometernaflösung	8	μm
Abtastezeit	$< 0,1$	ms
Kraftmessung	0,05 bis 10	N
Henky Dehnung	bis Dehnrate $\dot{\epsilon}_0 = 10$	s^{-1}
Dehnbereich:		
• bei vorgegebenen Dehnrate	$0,01 < \dot{\epsilon}_0 < 300$	s^{-1}
• Dehnrate in der Probe	$10^{-5} < \dot{\epsilon}_0 < 10$	

Tabelle 5.2: Auflistung der Spezifikationen des Dehnrheometers HAAKE CaBER in der erweiterten Ausstattung mit Kraftmessung [THE09].

Alle Farbspaltungsversuche dieser Arbeit wurden mit diesem Dehnrheometer durchgeführt. Durch den Umbau bzw. die Erweiterung mit den bereits beschriebenen Komponenten des optischen Systems ergaben sich weitere Spezifikationen und Versuchsparameter, die unter Kapitel 5.3 genannt werden.

5.1.2 Hochgeschwindigkeitskamera Fastcam SA 4

Die Fastcam SA 4 ist eine Highspeed-Kamera der Firma PHOTRON. Ihre erweiterte Modellbezeichnung lautet „Model 500 K – M1“. Es handelt sich hierbei um eine Schwarz-Weiß-Kamera mit einem monochromen CMOS-Sensor. Die maximale Bildrate beläuft sich auf 500.000 Bilder pro Sekunde (engl. frames per second). Weitere Spezifikationen zeigt die Tabelle 5.3 [PHO09], [ÜCÜ12], [VID12].

Spezifikationen	Wert/Bezeichnung
maximale Bildrate (fps)	500.000
maximale Auflösung	1024×1024
maximale Verschlusszeit (shutter)	$1 / 1.000.000 \text{ sec. } (1 \mu\text{s})$
Sensor	12 Bit Monochrom – CMOS
Pixelgröße	$20 \mu\text{m}$
Speicher	8 GB

Tabelle 5.3: Tabelle mit den Spezifikationen der Highspeed-Kamera Fastcam SA 4 der Firma Photron [PHO09], [VID12].

Der Schwarz-Weiß-Sensor der Highspeed-Kamera hat eine Größe von ca. $20 \times 20 \text{ mm}$ und seine zu übertragende Datenrate ist begrenzt. Abhängig von der Auflösung des Sensors kann nur eine bestimmte Bildrate (Bilder/Sekunde) erreicht werden. Abbildung 5.5 zeigt

die Auflösung des Sensors über der Bildrate (Bildern/Sekunde), die aufgenommen werden können [PHO09].

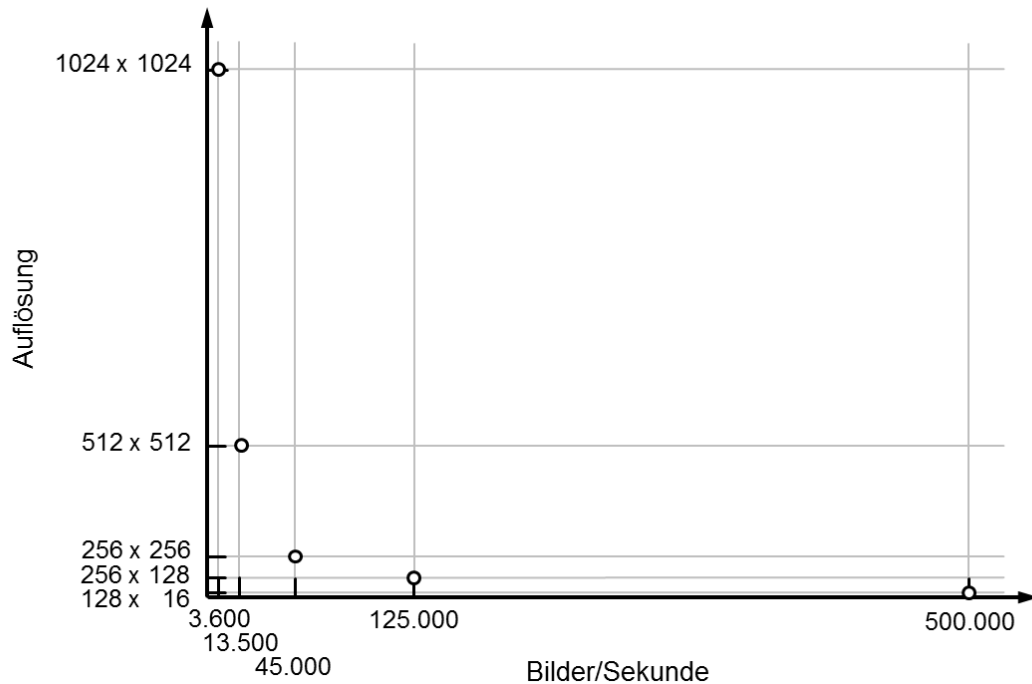


Abbildung 5.5: Qualitative Darstellung der Auflösung der Highspeed-Kamera Fastcam SA 4 bei unterschiedlicher Bildrate (Bilder/Sekunde).

In Abbildung 5.5 wird deutlich, dass mit Abnahme der Bildauflösung die zeitliche Auflösung steigt. Im Rahmen dieser Arbeit war es wichtig, den Filamentabriss genau zu beobachten. Dabei spielt sowohl die Bildauflösung als auch die zeitliche Auflösung durch eine hohe Bildrate eine große Rolle. Durch eine hohe Sensorauflösung muss man den Augenblick des Abrisses erkennen. Gleichzeitig muss man mit einer Bildrate den Zeitpunkt des Abrisses erfassen. Deshalb wird in dieser Arbeit ein Kompromiss zwischen Auflösung und Bildrate eingegangen. Die für diese Arbeit relevanten Kameraeinstellungen der Highspeed-Kamera werden in Kapitel 5.3. genannt.

5.1.3 Lichtquelle StroboLED

Bei der StroboLED der Firma MAK-Bildtechnik handelt es sich um ein Weißlicht-LED-Feld (9 x 9), das hochfrequent und passend zu den Aufnahmen der Highspeed-Kamera (Fastcam SA 4) getriggert wird. Hierbei handelt es sich um die erweiterte Variante der StroboLED mit einer maximalen Bildfrequenz von 10.000 Hz. Das LED-Feld hat eine Gesamtleistung von 8 W. Die Lichtstärke einer Weißlicht-LED beträgt 6500 mcd (milli Candela) bei einem Öffnungswinkel von 15° und somit der Raumwinkeleinheit von 0,0538 sr (Steradian). Die Besonderheit bei einer Weißlicht-LED für Stroboskope ist der emittierte Blauanteil, der teilweise mit einem Lumineszenzfarbstoff (Phosphor) kombiniert wird. Daraus resultiert langwelliges, energiearmes gelbes Licht. Aus der additiven

Mischung von blauem und gelbem Licht ergibt sich das Farbspektrum des weißen Lichts (siehe Abb. 5.6) [BLE75], [LED12], [MAK11], [SCH04].

5.1.4 Dichroitischer Filter

Der dichroitische Interferenz-Filter NT52-532 der Firma Edmund Industrial Optics ist ein Blaufilter, der Licht mit einer Wellenlänge $> 500 \text{ nm}$ aus dem Farbspektrum herausfiltert. In Kombination mit der StroboLED wird dadurch ein blauer Lichtstrahl erzeugt. Der Vorteil dabei ist, dass das blaue Licht kurzwelliger ist als rotes oder grünes Licht und sich so Konturen von feinen Flüssigkeitsfilamenten mit einem Kamerasystem schärfer abbilden lassen. Dies war eine wesentliche Grundvoraussetzung für die Datenauswertung dieser Arbeit. Die Filterwirkung des dichroitischen Filters über der Wellenlänge wird in Abbildung 5.6 gezeigt [EDM12], [ITW12].

5.1.5 Planspiegel

Bei dem Planspiegel SEA-VIS der Firma Präzisions Glas & Optik handelt es sich um einen erweiterten Aluminium-Oberflächenspiegel mit einer dielektrischen Verstärkungsschicht. Dadurch besitzt er verbesserte Reflexionseigenschaften. Der Planspiegel ist speziell für Lichtstrahlen im Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm konzipiert. Abbildung 5.6 zeigt sowohl den Reflexionsbereich des Planspiegels als auch das Farbspektrum der StroboLED sowie die Filterwirkung des Planspiegels SEA-VIS.

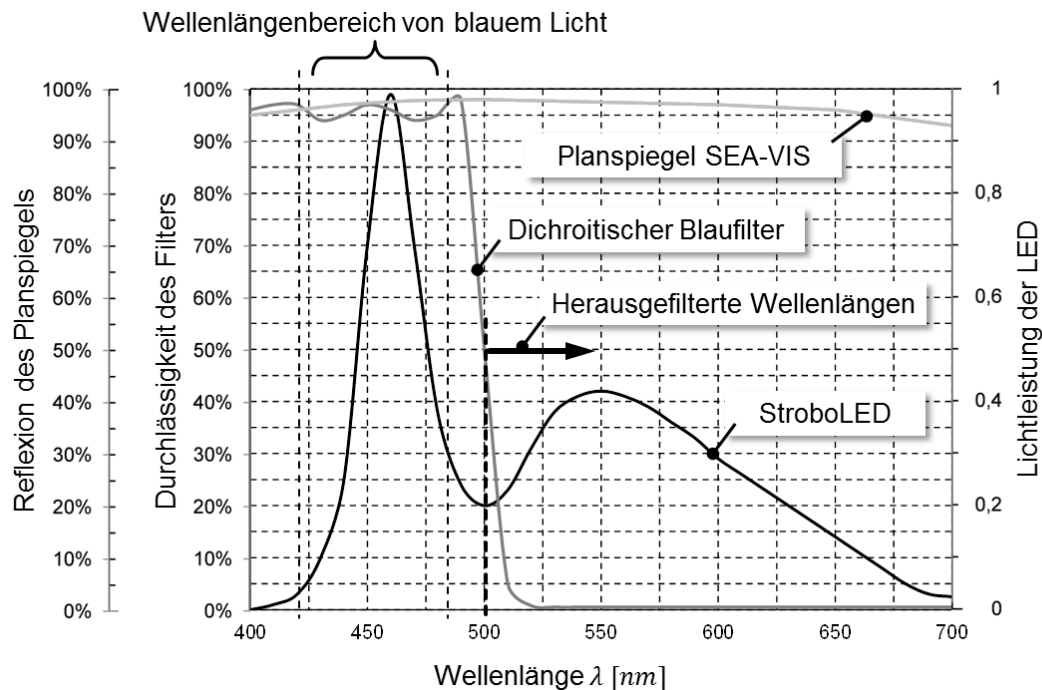


Abbildung 5.6: Qualitative Darstellung des Farbspektrums der StroboLED, des Filterspektrums des dichroitischen Blaufilters sowie des Reflexionsspektrums des Planspiegels.

Wichtig bei der Anwendung in dem Versuchsaufbau dieser Arbeit war die präzise Reflexion des blauen Lichtstrahls ohne Stör-Effekte. Der Lichtstrahl muss in die Optik der Highspeed-Kamera ohne Streustrahlung reflektiert werden [PRÄ12].

Der Verlauf des Farbspektrums der LED wird in Abbildung 5.6 nur qualitativ dargestellt und zeigt das grundsätzliche Spektrum einer Weißlicht-LED. Der tatsächliche Verlauf und die Intensität des Lichtspektrums des LED-Feldes dieser Arbeit sind nicht bekannt. Ebenfalls dargestellt ist das Filterspektrum des dichroitischen Blaufilters, der hier die Funktion eines Tiefpassfilters übernimmt. In Abbildung 5.6 wird auch das Reflexionsspektrum des Planspiegels dargestellt.

5.1.6 USB-Kamera

Die handelsübliche USB-Kamera PC 3315 der Firma BESETech [CON12] ist eine Mikroskopkamera mit einer optischen Auflösung von 1,3 Megapixeln. Sie hat eine bis zu 60fache Vergrößerung und vier Weißlicht-LED als Beleuchtung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde sie bei den Hauptversuchen in der ersten Versuchsreihe angewandt. Hierbei fungierte sie als Kontrolleinheit, um eine mögliche Entnetzung der Flüssigkeiten auf der Druckform auszuschließen.

Im folgenden Abschnitt wird auf die Vorversuche dieser Arbeit eingegangen, die die Entwicklung des Versuchsaufbaus und die Anwendung der genannten Komponenten beeinflusst haben.

5.2 Vorversuche

Der Versuchsaufbau dieser Arbeit hat sich durch eine Vielzahl an Versuchen (ca. 800), die im Vorfeld stattfanden, entwickelt. Die durchgeführten Vorversuche zur Farbspaltung werden in diesem Abschnitt behandelt. Hierzu wird zum Einen auf die Kraftmessung bei der Plattenseparation unter Anwendung unterschiedlicher Oberflächen eingegangen und zum Anderen auf die Entwicklung der zunächst kreisförmigen Druckform hin zu einem schmalen Steg (Linienkontakt).

5.2.1 Kraftmessung

Bei den Vorversuchen zur Farbspaltung wurde in einem ersten Schritt untersucht, welchen Einfluss unterschiedliche Oberflächen auf die Zugkraft (Separationskraft) haben. Hierzu wurde mithilfe des Kraftaufnehmers des Dehnrheometers die Zugkraft bestimmt. Die Versuche fanden noch vor der Anwendung der Highspeed-Kamera oder anderer

Komponenten eines optischen Systems statt. Abbildung 5.7 zeigt die schematische Darstellung der zwei unterschiedlichen Versuchsaufbauten und deren Plattenoberflächen.

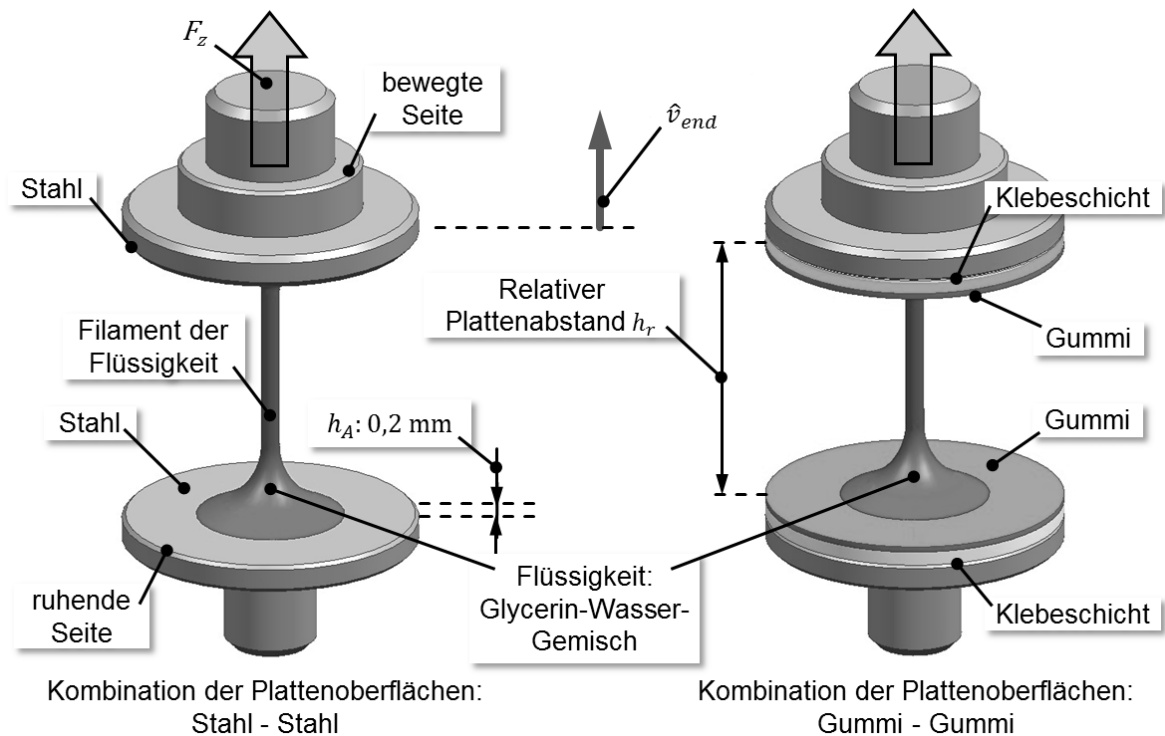


Abbildung 5.7: Schematische Darstellung der Vorversuche zur Bestimmung der Zugkraft bei der Kombination der Plattenoberflächen Stahl - Stahl und Gummi - Gummi.

Hierzu wurden als Referenz zwei unterschiedliche Oberflächen in Kombination Stahl - Stahl und Gummi - Gummi gewählt. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Rauheitswerte beider Oberflächen nicht bekannt sind. Als Flüssigkeit wird ein Glycerin-Wasser-Gemisch und somit eine Newton'sche Flüssigkeit angewandt. Tabelle 5.4 zeigt alle Versuchsparameter zu den Versuchen der Kraftmessung.

Dehnrheometer	
Plattenabstand (h_A) in Ausgangssituation	0,2 mm
Endgeschwindigkeit der Plattenseparation \hat{v}_{end}	0,2 ; 0,45 ; 0,9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Kraftaufnehmer (Piezo-Sensor 9215)	bis 20 N

Oberflächen	
Plattendurchmesser	16 mm
Stahl	geschliffene Stahlplatte
Gummi	Gummituch (Saphira 366)

Flüssigkeit	
Glycerin-Wasser-Gemisch	Glycerin (75%) ; Wasser (25%)
Flüssigkeitsmenge	40 μl

Tabelle 5.4: Darstellung der Versuchsparameter der Vorversuche - Kraftmessung.

In Tabelle 5.4 sind die Parameter des Dehnrheometers, die Eigenschaften der Plattenoberflächen und der Flüssigkeiten dargestellt. Bei den Parametern wird die Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation variiert. Diese sind 0,2; 0,45 und $0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Das Datenblatt des Kraftaufnehmers [KIS12] zeigt, dass von Seiten des Sensors sogar eine Kraft von 20 N gemessen werden kann. Der Durchmesser der Platten beträgt 16 mm . Als Oberflächen werden geschliffene Stahlplatten und das Gummituch Saphira 366 verwendet. Die Flüssigkeitsmenge des Glycerin-Wasser-Gemischs bleibt konstant bei $40 \text{ } \mu\text{l}$.

Bei dem ersten Versuch mit der Kombination Stahl - Stahl zeigt sich bei der Variation der Geschwindigkeit folgender Verlauf der Zugkraft F_z (s. Abb. 5.8).

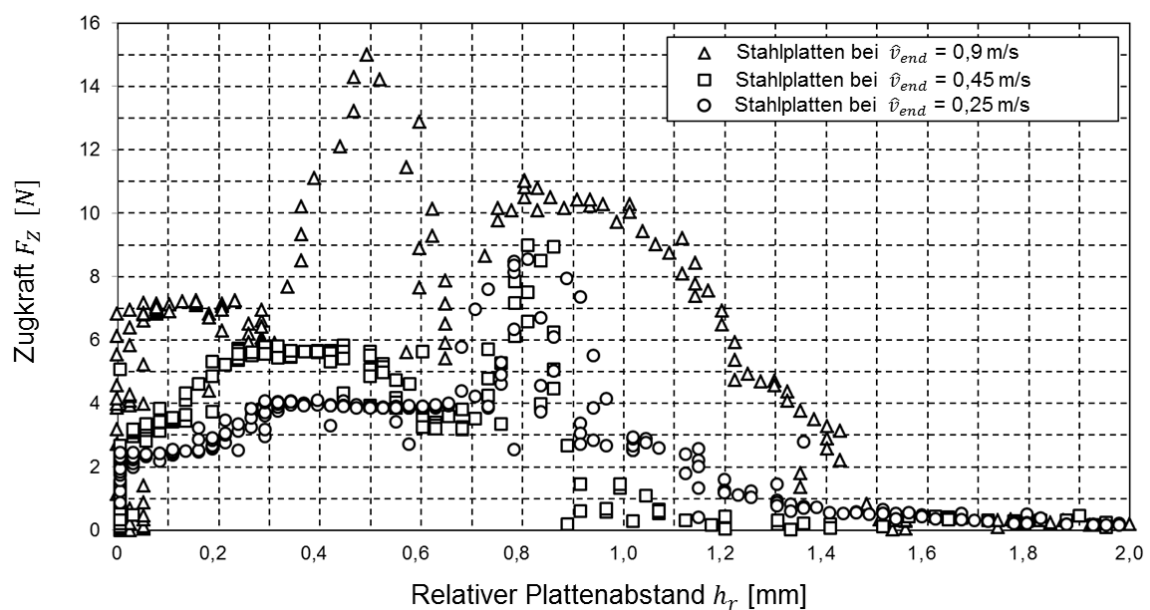


Abbildung 5.8: Darstellung der Werte der Zugkraft F_z über dem relativen Plattenabstand h_r bei der Kombination der Plattenoberflächen Stahl - Stahl.

In Abbildung 5.8 wird der Verlauf der Zugkraft F_z über dem relativen Plattenabstand h_r dargestellt. Hier wird gezeigt, dass sich mit Zunahme der Endgeschwindigkeit der Plattenseparation \hat{v}_{end} der Verlauf der Kurven unterscheidet. Die Verläufe wurden mehrfach wiederholt und waren für die jeweiligen Endgeschwindigkeiten immer reproduzierbar. Bei einer Endgeschwindigkeit der Plattenseparation \hat{v}_{end} von $0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ springt die Zugkraft unmittelbar nach dem Start auf ein Kraftniveau von ca. 7 N . Bei einem relativen Plattenabstand von $0,5 \text{ mm}$ erreicht die Zugkraft ihr Maximum (bei ca. 15 N). Anders verhält es sich bei den zwei niedrigeren Endgeschwindigkeiten. Hier springen die Zugkräfte zu Beginn auf ein Niveau von ca. $2,2 \text{ N}$ und erreichen erst nach einem relativen Plattenabstand von ca. $0,8 \text{ mm}$ die maximale Zugkraft (bei ca. 11 N). Es besteht die Möglichkeit, dass die Flüssigkeit bei niedrigeren Separationsgeschwindigkeiten nachfließen kann. Dadurch ergeben sich eine geringere Kapillarkwirkung, ein nicht so ausgeprägter Kraftanstieg und somit ein anderer Kraftverlauf.

Bei Anwendung der Gummiplatten wird ein anderer Kraftverlauf erkennbar (s. Abb. 5.9).

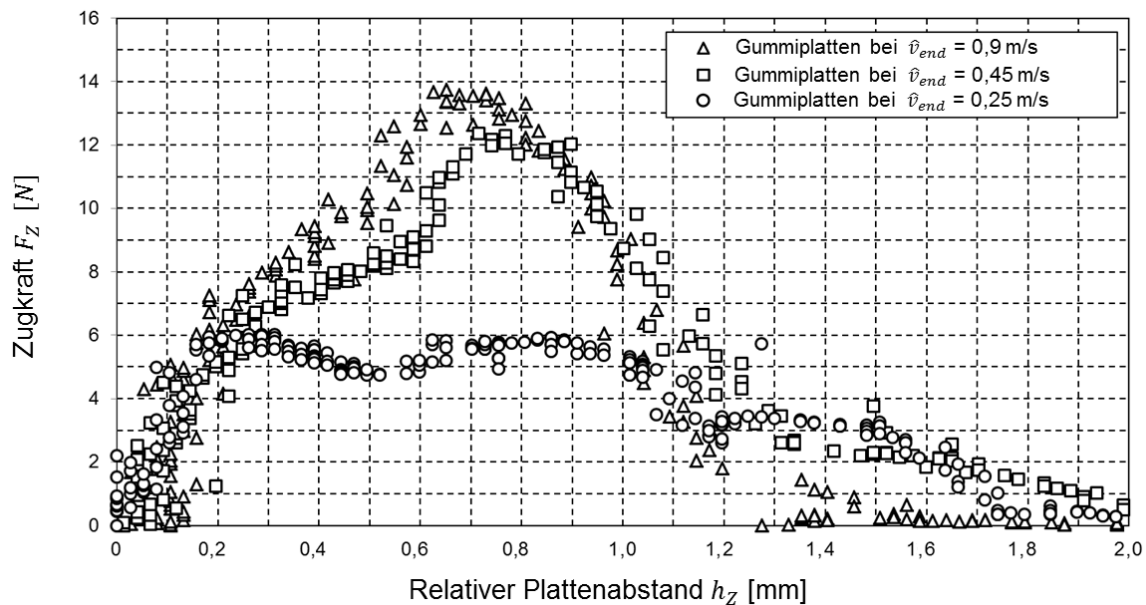


Abbildung 5.9: Darstellung der Werte der Zugkraft F_z über dem relativen Plattenabstand h_r bei der Kombination der Plattenoberflächen Gummi - Gummi.

In Abbildung 5.9 ist zu erkennen, dass das Sprungverhalten der Zugkraft F_z , das bei den Stahlplatten auftritt, nicht vorkommt. Die Oberfläche des Gummituchs Saphira 366 ist ein Standard-Gummituch aus dem Offsetdruck und hat ein hydrophobes (wasserabweisendes) Verhalten. Es wird daher angenommen, dass das Glycerin-Wasser-Gemisch an der Oberfläche des Gummituchs besser nachfließen kann. Geklärt ist dieser Zusammenhang nicht. Es gibt auch die Möglichkeit, dass das Gummituch bei der Separation der Platten elastisch verformt wird und hierdurch die Wirkung des Kraftsprungs dämpft. Auch kann ein Zusammenspiel beider Faktoren diskutiert werden. Es zeigt sich grundsätzlich, dass unterschiedliche Oberflächen einen Einfluss auf den Separationsvorgang, abhängig von deren Materialeigenschaften, haben. Der Verlauf der Zugkraft kann ein Indiz für die Einschnürung der Flüssigkeit und der Filamentbildung sein. Daher werden zur Beobachtung eine Highspeed-Kamera und weitere optische Komponenten verwendet. Dies eröffnet die Möglichkeit, die Entstehung des Filaments bei unterschiedlichen Oberflächen zu beobachten.

5.2.2 Fokussierung

Bei der Verwendung der Highspeed-Kamera (Fastcam SA 4) ergeben sich eine Vielzahl an Voraussetzungen, die das optische System erfüllen muss. Hierzu gehört z. B. die Anpassung und Abstimmung aller optischen Komponenten. Bei den Untersuchungen wird erkannt, dass die sich gebildeten Filamente einen Durchmesser von $< 1 \mu\text{m}$ besitzen. Um hier verlässliche Daten bezüglich des Abrisses von Filamenten zu generieren, muss die

Schärfentiefe verringert werden. Dadurch entwickelte sich der Versuchsaufbau von einem dreidimensionalen zu einem quasi zweidimensionalen Aufbau. Dieser ermöglicht, den Filamentabriss zu fokussieren. Abbildung 5.10 zeigt schematisch diese Entwicklung.

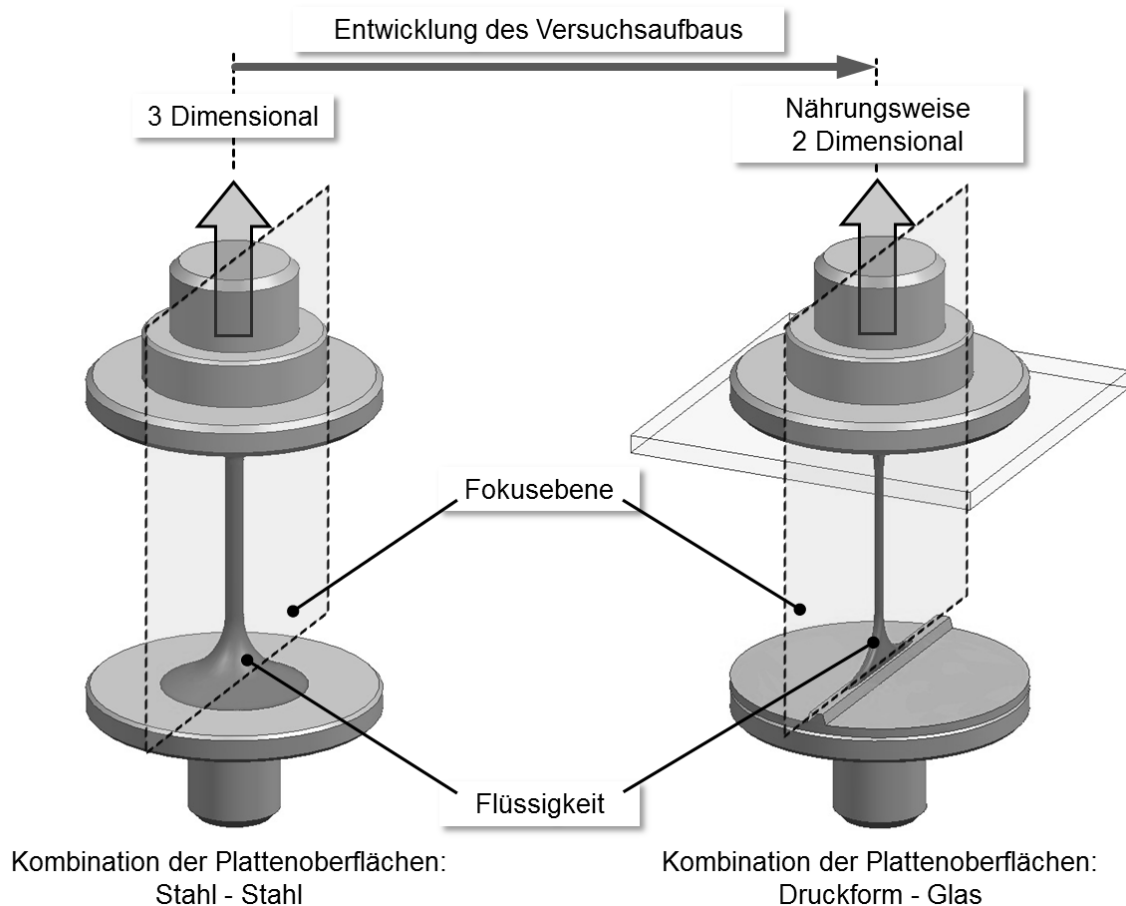


Abbildung 5.10: Schematische Darstellung der Entwicklung des Versuchsaufbaus mit Fokusebene von einem dreidimensionalen hin zu einem quasi zweidimensionalen Aufbau.

Mit der Zielsetzung, die Filamentbildung hoch aufgelöst zu beobachten, wird die Highspeed-Kamera mit einem Makroobjektiv bestückt. Hierbei handelt es sich um ein Makroobjektiv der Firma Canon (MACRO 100 mm) mit einer Brennweite von 100 mm. Mit Verringerung des Abstands des Objektivs zum Filament wird der projizierte Arbeitsbereich des Dehnrheometers kleiner. Die Auflösung steigt, während die Schärfentiefe abnimmt. Ziel ist es, den ganzen Arbeitsbereich des Dehnrheometers zu beobachten. Aus diesen Zusammenhängen ergibt sich ein Zielkonflikt. Eine weitere Grenze, die sich zeigt, ist die Aufnahmemöglichkeiten der Highspeed-Kamera. So werden in dieser Arbeit ganz unterschiedliche optische Einstellungen angewandt, um für den jeweiligen Fall bestimmte Phänomene im Detail bei der Farbspaltung zu beobachten und auszuwerten.

Bei der Entwicklung des Versuchsaufbaus hin zu einem zweidimensionalen Aufbau wurde eine Vielzahl von Versuchen durchgeführt. Abbildung 5.11 zeigt die Entwicklung der verwendeten Plattenoberflächen.

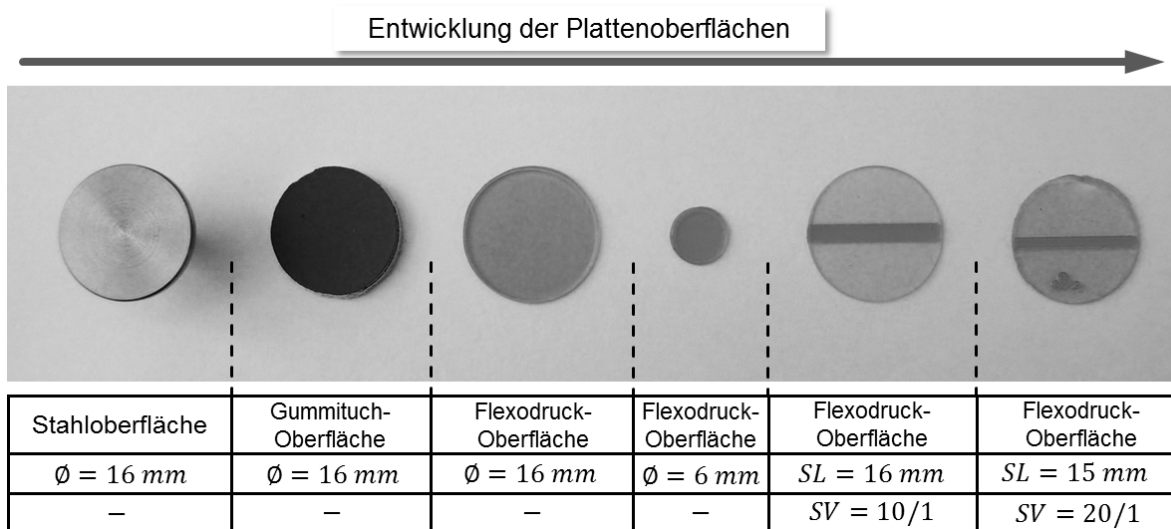


Abbildung 5.11: Darstellung der Entwicklung der Plattenoberfläche.

In Abbildung 5.11 ist die Entwicklung von einer kreisförmigen Platte hin zu einem schmalen Steg (Linienkontakt) dargestellt. Die Abkürzungen SL und SV stehen für Steglänge und Stegverhältnis (Steglänge/Stegbreite). Bei dem Schritt hin zu einem Linienkontakt ändert sich die Farbspaltung zu einer nahezu zweidimensionalen Strömungsform. Im Falle einer kreisförmigen Fläche schnürt sich die Kontur der Flüssigkeit, bei der Separation der Platten, von allen Seiten gleichmäßig ein. Bei einem Linienkontakt hingegen ist die Länge viel größer als die Breite. Dadurch wird sich die Flüssigkeit bei der Separation der Platten von zwei Seiten über die Breite relativ langsam und über die Länge relativ schnell einschnüren. Dieses Verhalten der Einschnürung bei einem Linienkontakt und die daraus resultierenden Phänomene werden in den Hauptversuchen dieser Arbeit untersucht.

Im folgenden Abschnitt wird auf die Hauptversuche dieser Arbeit eingegangen. Hierzu werden der Linienkontakt und dessen Oberflächenstrukturierung erläutert und die angewandten Parameter vorgestellt.

5.3 Hauptversuche

Die Hauptversuche bilden den Kern der wissenschaftlichen Untersuchung der Farbspaltung an strukturierten Oberflächen im Flexodruck in dieser Arbeit. Die Untersuchung der Farbspaltung an strukturierten Linienkontakten ist in der Druckindustrie völlig neu. Auch die Anwendung der parallelen Plattenseparation als vereinfachtes Modell der Farbspaltung in einem Druckwerk ist neu. Neben dem bisher vorgestellten Versuchsaufbau und den gezeigten Vorversuchen wird hier detailliert der Farbspaltungsvorgang unter Anwendung eines Linienkontakts beschrieben und Bewegungsabläufe des Aufbaus aufgezeigt. Im Anschluss daran folgen die Beschreibung der einzelnen Versuchsserien dieser Arbeit und die dabei erfolgte Parameterstudie.

5.3.1 Linienkontakt

Bei der Farbspaltung und der Anwendung eines strukturierten Linienkontakts gibt es Besonderheiten, auf die im Folgenden detailliert eingegangen wird. Mit dem beschriebenen Versuchsaufbau wird untersucht, welchen Einfluss ein strukturierter Linienkontakt auf die Filamentbildung und Farbspaltung hat. Hierzu wird ein Steg mit einer definierten Oberflächenstrukturierung versehen. Es handelt sich bei dem Steg um eine Druckform aus dem Flexodruck mit einem strukturierten Raster. Abbildung 5.12 zeigt in Vergrößerung das vordere Ende des Stegs mit dem darauf befindlichen Raster.

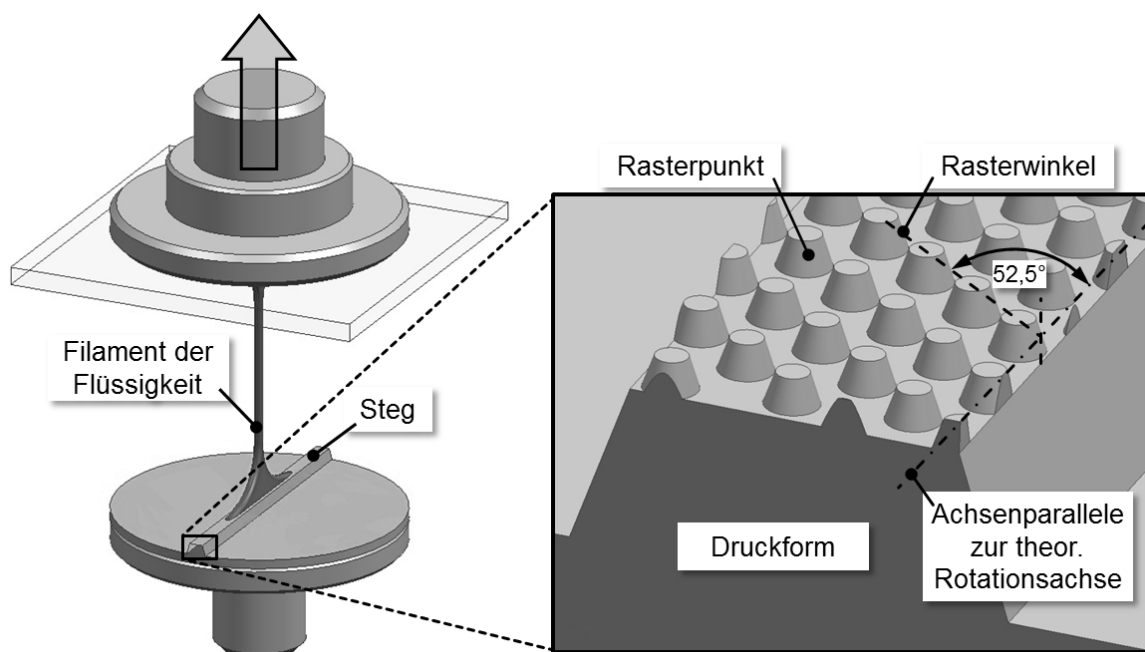


Abbildung 5.12: Darstellung des Versuchsaufbaus mit vergrößerter Betrachtung des Stegs und das darauf befindliche Raster.

Der Steg hat eine Länge von 15 mm und ist $0,75\text{ mm}$ breit. Mögliche Variablen bezüglich der Druckform und des Rasters sind Rasterweite, Rasterwinkel (s. Kapitel 2.2.4) und der Soll-Tonwert (s. Kapitel 4.2.1). Abbildung 5.12 zeigt eine mögliche Ausbildung des Filaments der Flüssigkeit sowie die obere Glasplatte, die separiert wird. Diese schematische Darstellung stellt vereinfacht die Farbspaltung im Druckprozess zum Verdrucken von funktionalen Flüssigkeiten auf Glasoberflächen dar.

Abbildung 5.13 zeigt die schematische Darstellung der Einschnürung des Filaments und aus der Kamera-Perspektive den Zustand in einem nahezu zweidimensionalen System.

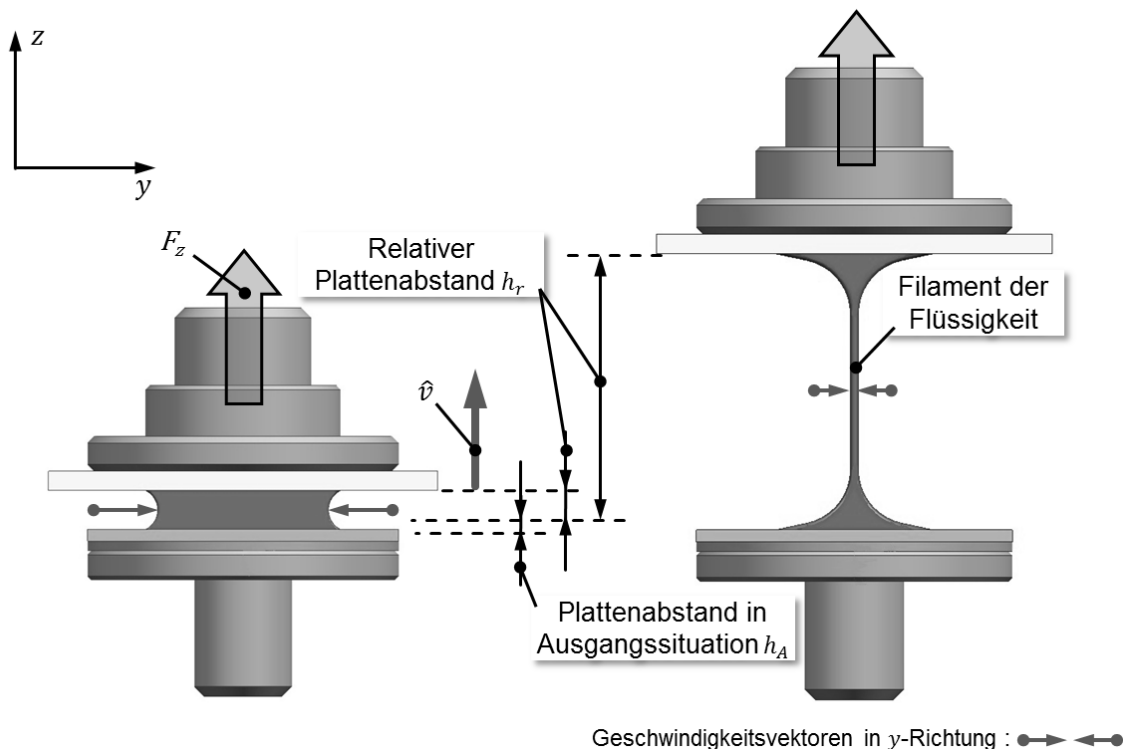


Abbildung 5.13: Darstellung des Versuchsaufbaus aus der Kameraperspektive, die vereinfachte Einschnürung des Filaments und die dabei auftretenden qualitativen Geschwindigkeitsvektoren für zwei verschiedene Zeitpunkte.

Durch den Steg reduziert sich das dreidimensionale System auf ein Koordinatensystem mit y - und z -Achse (s. Abb. 5.13). Dieses System ist näherungsweise zweidimensional. Im Anfangszustand der Plattenseparation liegt allerdings ein dreidimensionales System vor. Hierbei schnürt sich die Flüssigkeit über die Länge und Breite des Stegs, während sich die Platten separieren, ein. In der Abbildung ist schematisch die Einschnürung des Filaments bei fortgeschrittener Separation und somit das zweidimensionale System dargestellt. Hier sind qualitativ die Geschwindigkeitsvektoren in y -Richtung zu sehen, welche zu Beginn der Plattenseparation relativ groß sind. Sie nehmen mit fortschreitendem relativem Plattenabstand h_r ab. Dies ist auch der Fall, wenn sich mehrere Filamente bilden. Der Plattenabstand in der Ausgangssituation h_A definiert die zwischen Druckform und Glasplatte befindliche Flüssigkeitsmenge. Die Zugkraft F_z wird bei diesen Versuchen nicht

bestimmt, da die auftretenden Kräfte im Verhältnis zum Rauschen des Sensorsignals zu klein sind. Die Temperatur aller Versuche dieser Arbeit liegt bei 23 °C. In Abbildung 5.13 ist die Separationsgeschwindigkeit \hat{v} dargestellt, die im folgenden Abschnitt näher behandelt wird.

5.3.2 Separationsgeschwindigkeit

Bei der parallelen Plattenseparation wird die obere Platte aus der Ruhelage bis zu ihrer Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} beschleunigt. Um dies zu charakterisieren wurde der Verlauf der Separationsgeschwindigkeit des Dehnrheometers über dem relativen Plattenabstand h_r für unterschiedliche Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} untersucht. Dies geschah bei den am Dehnrheometer einstellbaren Endgeschwindigkeiten \hat{v}_{end} von 0,1 bis 0,9 $m \cdot s^{-1}$. Mit \hat{v}_{end} wird die Endgeschwindigkeit der oberen Platte beschrieben. Die obere Platte beschleunigt zu Beginn der Plattenseparation sehr stark (s. Abb. 5.14). Nach einem bestimmten relativen Plattenabstand erreicht sie ihre maximale Separationsgeschwindigkeit \hat{v}_{max} und fällt dann bis zur Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} ab. In dieser Arbeit steht die Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} für den veränderbaren Parameter, obwohl dahinter ein gesamter Geschwindigkeitsverlauf des Dehnrheometers steht. Die Geschwindigkeitsverläufe bei unterschiedlichen Endgeschwindigkeiten sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Dabei werden die Geschwindigkeitsverläufe aus den Aufnahmen der Highspeed-Kamera mit einem Bildbearbeitungsprogramm (Adobe Photoshop) und einem Statistikprogramm (Microsoft Excel) ermittelt. Hierzu werden Aufnahmen mit und ohne Flüssigkeit bei der Plattenseparation ausgewertet.

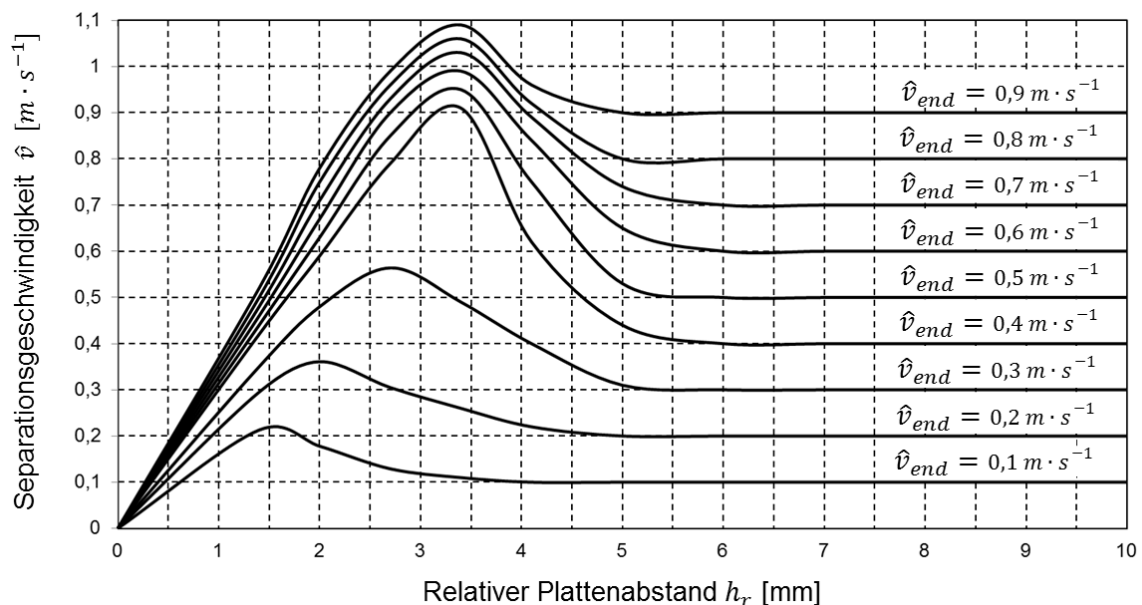


Abbildung 5.14: Gemessen Verläufe der Separationsgeschwindigkeit des Dehnrheometers.

In Abbildung 5.14 ist das Überschwingen der Geschwindigkeitsverläufe zu sehen. Ein Überschwingen der Geschwindigkeitsverläufe ist bedingt durch das Regelsystem des Dehnrheometers. Die Darstellung der Geschwindigkeitsverläufe soll Fehlinterpretationen der Ergebnisse bei der Farbspaltung vermeiden. In Abbildung 5.14 wird gezeigt, dass bestimmte Geschwindigkeitsverläufe bei der Beschleunigung sehr nahe zusammenliegen.

Um das Verhalten der Einschnürung bei einem Linienkontakt zu untersuchen, werden im Rahmen dieser Arbeit drei Versuchsserien durchgeführt. Diese werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

5.3.3 Erste Versuchsserie – Erfassung von Phänomenen

Zur Erfassung von unterschiedlichsten Phänomenen bei der Farbspaltung wird bei der ersten Versuchsdurchführung eine Vielzahl an Parametern variiert. Dabei wird untersucht, wie sich die Änderung der Parameter auf die Farbspaltung auswirkt. Hierzu wird untersucht, wie sich unterschiedliche Flüssigkeiten (Wasser, Glycerin und Magenta 36-2) bei der Separation der Platten verhalten und welche Phänomene sich einstellen. Es wird betrachtet, welchen Einfluss eine Änderung der Flüssigkeitsmenge auf die Farbspaltung hat. Um die Flüssigkeitsmenge zu variieren, muss je nach Menge der Flüssigkeit der Plattenabstand h_A in seiner Ausgangssituation verändert werden (s. Abb. 5.15). Es werden hierzu drei verschiedene Flüssigkeitsmengen verwendet. Diese sind 1,12; 2,25 und 4,5 μl . Dazu variiert der Plattenabstand in der Ausgangssituation h_A von 0,1 bis 0,4 mm. Es wird grundsätzlich untersucht, ob die Menge der Flüssigkeit in dem Versuchsaufbau einen Einfluss auf die Filamentbildung hat. Eine weitere veränderliche Größe ist die Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation in einem Bereich von 0,1 bis 0,9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Dabei wird in Schritten von 0,1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ vorgegangen. Es wird untersucht, welchen Einfluss unterschiedliche Separationsgeschwindigkeiten auf das Nachfließverhalten einer Flüssigkeit an einer strukturierten Oberfläche haben. Dabei wird der Ist-Tonwert der Druckform zwischen 100 % und 56,53 % variiert. Hierbei soll analysiert werden, ob eine Änderung der Strukturierung eine Auswirkung auf das Nachfließverhalten bzw. auf das Verhalten der Filamentbildung der Flüssigkeit hat. Eine weitere Variation des Ist-Tonwerts wird aufgrund der großen Anzahl an Versuchen nicht vorgenommen. Es werden ca. 1400 Versuche durchgeführt. Die Rasterweite und der Rasterwinkel werden dabei nicht verändert und blieben konstant bei 48 Linien/cm und 52,5° (s. Abb. 5.15).

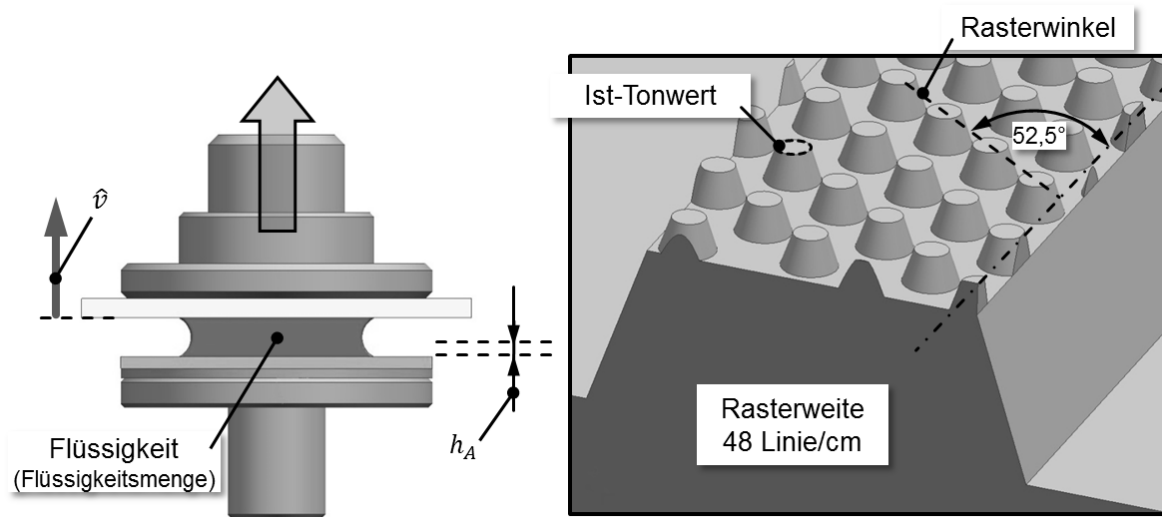


Abbildung 5.15: Schematische Darstellung der Kontaktzone des Stegs und die variierten Größen zur Erfassung von Phänomenen der Farbspaltung.

Die Ergebnisse zur Erfassung von Phänomenen werden in Kapitel 6.1 dargestellt. An dieser Stelle wird dennoch auf Erkenntnisse zur Weiterentwicklung des Versuchsaufbaus bezüglich der Dosierung der Flüssigkeitsmenge eingegangen. Bei der Dosierung der Flüssigkeiten mit einer Direktverdrängungspipette Rainin Pos-D der Firma Rainin Instrument, wird die Flüssigkeit vor dem jeweiligen Separationsversuch auf dem Steg der Druckform aufgebracht. Dies geschieht mit einer Genauigkeit von $0,05 \mu\text{l}$. Bei dem Plattenabstand in Ausgangssituation h_A kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei der mechanischen Einstellung der Plattenhöhe die Flüssigkeitsmenge von $1,13 \mu\text{l}$ aus einem Spalt von $< 0,1 \text{ mm}$ gedrückt wird. Es ist deshalb nicht klar, ob eine andere Flüssigkeitsmenge als die genannte in der ersten Versuchsserie vorliegt. Dieser Fehler reduziert sich prozentual mit Anstieg der Flüssigkeitsmenge. Bei der Flüssigkeit Magenta 36-2 stellt sich die Dosierung mit der Pipette schwierig dar. Grund hierfür ist die hohe Scherviskosität bei einer niedrigen Scherrate (s. Tab. 4.3). Dies kann an der Ausrichtung der dispergierten Feststoffteilchen oder der Bildung von Agglomeraten liegen. Auch das gleichmäßige Auftragen auf den Steg ist nur bedingt möglich. Hierzu wird als Kontrolleinheit die in Kapitel 5.1.6 vorgestellte USB-Kamera verwendet, um eine gleichmäßige Benetzung der Flüssigkeit an der Oberfläche der Druckform sicherzustellen. Es wird erkannt, dass die mechanische Einstellung der Plattenhöhe verbessert werden muss. Dies wird durch eine konstruktive Änderung bei der Befestigung der Plattenaufnahmen realisiert.

Die Abbildung 5.15 zeigt die in der ersten Versuchsserie veränderten Parameter. Eine Übersicht der gesamten Versuchsparameter der ersten Versuchsserie und der variierten Größen zeigt Tabelle 5.5.

Dehnrheometer			
Plattenabstand (h_A) in Ausgangssituation		0,1 mm	
		0,2 mm	
		0,4 mm	
Endgeschwindigkeiten \hat{v}_{end} Plattenseparation		0,1 bis 0,9 m · s ⁻¹	
Oberflächen			
Obere Platte	Glas	Vollfläche	
Untere Platte	Druckform (Flexodruck)	Steg (Länge 15 mm, Breite 0,75 mm)	
		Rasterweite	48 Linien/cm
		Rasterwinkel	52,5°
		Ist-Tonwert	100%
			56,53%
Flüssigkeit			
Wasser	η_{110} = 1,0 mPas	σ_L = 72,60 mN/m	
Glycerin	η_{110} = 453 mPas	σ_L = 66,86 mN/m	
Magenta 36-2	η_{110} = 3000 mPas	σ_L = 28,09 mN/m	
Flüssigkeitsmenge	1,13 µl		
	2,25 µl		
	4,50 µl		
Highspeed-Kamera			
Bildrate (fps)	20.000		
Auflösung	512 x 352		
Verschlusszeit (shutter)	1 / 25.000 sec.		
Makro-Objektiv	Canon MACRO 100 mm		

Tabelle 5.5: Versuchsparameter der ersten Versuchsserie zur Erfassung von Phänomenen der Farbspaltung.

5.3.4 Zweite Versuchsserie – Tonwert und Separationsgeschwindigkeit

Die zweite Versuchsserie dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Variation von Tonwert und Separationsgeschwindigkeit und den dabei auftretenden Phänomenen der Farbspaltung von Druckfarben. Hierbei wird der Einfluss des Ist-Tonwerts der Druckform bei 100 %; 64,58 %; 37,65 % und 2,23 % untersucht, um einen möglichst großen Bereich unterschiedlichster Oberflächenstrukturierungen zu analysieren. Die Variation der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation erfolgt wie in der ersten Versuchsserie von 0,1 bis 0,9 $m \cdot s^{-1}$ in Schritten von 0,1 $m \cdot s^{-1}$. Eine Übersicht der in der zweiten Versuchsserie vorkommenden Parameter zeigt Tabelle 5.6.

Dehnrheometer			
Plattenabstand (h_A) in Ausgangssituation		0,2 mm	
Endgeschwindigkeiten \hat{v}_{end} Plattenseparation		0,1 bis 0,9 m · s ⁻¹	
Oberflächen			
Obere Platte	Glas	Vollfläche	
Untere Platte	Druckform (Flexodruck)	Steg (Länge 15 mm, Breite 0,75 mm)	
		Rasterweite	48 Linien/cm
		Rasterwinkel	52,5°
		Ist-Tonwert	100%
			64,58%
			37,65%
2,23%			
Flüssigkeit			
Magenta 36-2		$\eta_{110} = 3000 \text{ mPas}$	$\sigma_L = 28,09 \text{ mN/m}$
Flüssigkeitsmenge		2,25 μl	
Highspeed-Kamera			
Bildrate (fps)		20.000	
Auflösung		512 x 352	
Verschlusszeit (shutter)		1 / 25.000 sec.	
Makro-Objektiv		Canon MACRO 100 mm	

Tabelle 5.6: Versuchsparameter der zweiten Versuchsserie.

Die Rasterweite und der Rasterwinkel bleiben konstant bei 48 Linien/cm und 52,5°. Ziel ist es, einen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und strukturierter Oberfläche der Druckform herzustellen und in den Phänomenen der Farbspaltung zu erkennen.

Der Plattenabstand in der Ausgangssituation beträgt 0,2 mm. Dieser wird eingestellt und bleibt die gesamte zweite Versuchsserie konstant. Dadurch soll ein möglicher mechanischer Fehler durch Änderung des Plattenabstands und der Flüssigkeitsmenge verhindert werden.

Neben dem standardmäßigen Einsatz der Pipette wird zur Dosierung ein weiterer Kontrollmechanismus angewandt. Dieser soll mögliche Handhabungsfehler bei der Dosierung reduzieren und die Reproduzierbarkeit erhöhen. Hierzu wird die Druckfarbe mit der Pipette als Tropfen mit einer definierten Flüssigkeitsmenge auf einer Glasoberfläche aufgetragen. In einem weiteren Schritt wird dieser Tropfen mit dem Kontaktwinkelmessgerät KRÜSS DSA 100 zum Abgleich vermessen und dessen Flüssigkeitsmenge ermittelt. Stimmt die gewünschte Flüssigkeitsmenge mit der an der Pipette eingestellten Flüssigkeitsmenge überein und ist dieser Vorgang bei Mehrfachwiederholung reproduzierbar, kann die eigentliche Dosierung der Flüssigkeit auf dem Steg der Druckform bzw. im Versuchsaufbau erfolgen. Dabei wird die Flüssigkeit, in

diesem Fall Magenta 36-2, mithilfe der Pipette gleichmäßig auf dem Steg aufgetragen. Das Auftragen gestaltet sich hier jederzeit reproduzierbar. Die Flüssigkeitsmenge, die an der Pipette zurückbleibt, ist so gering, dass der hier auftretende Fehler der Flüssigkeitsmenge mit $< 5\%$ abgeschätzt werden kann. Die Dosierung wurde während der gesamten Versuchsserie mehrfach überprüft, um mögliche Fehlerquellen auszuschließen.

5.3.5 Dritte Versuchsserie – Rasterwinkel und Flüssigkeit

Die dritte Versuchsserie befasst sich mit der Variation von Rasterwinkel, Rasterweite und Flüssigkeit. Ziel ist es, Abhängigkeiten von Rasterung und Flüssigkeit zu untersuchen und aufzuzeigen. Der variierte Rasterwinkel der Druckform beträgt 0° und $52,5^\circ$. Dadurch werden die auf der Druckform befindlichen Rasterpunkte längs der Stegrichtung ausgerichtet. Abbildung 5.16 verdeutlicht diesen Sachverhalt der Oberflächenstrukturierung bei einer Änderung des Rasterwinkels.

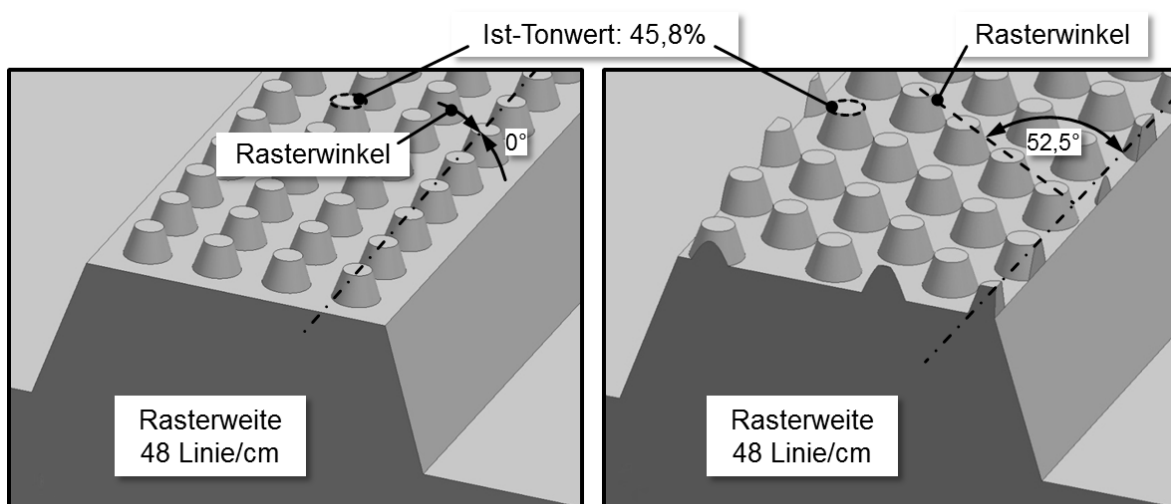


Abbildung 5.16: Schematische Darstellung des Stegs der Druckform mit unterschiedlichen Rasterwinkeln.

Der Soll-Tonwert bleibt konstant bei 50% . Dies entspricht bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm einem Ist-Tonwert von $45,8\%$ und bei 60 Linien/cm einem Ist-Tonwert von $44,63\%$. Neben der Farbe Magenta 36-2 kommt die im Vergleich etwas niedriger viskose Farbe Magenta 39-6 zum Einsatz (s. Tabelle 4.3). Es wird untersucht, welchen Einfluss die Art der Flüssigkeit auf die anderen Parameter hat. Die Variation der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation erfolgt wie in den ersten zwei Versuchsserien von $0,1$ bis $0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in Schritten von $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. In der dritten Versuchsserie wird, wie in den Versuchsserien zuvor, die Separationsgeschwindigkeit variiert. Einen Überblick über die Versuchsparameter der dritten Versuchsserie zeigt Tabelle 5.7.

Dehnrheometer			
Plattenabstand (h_A) in Ausgangssituation		0,2 mm	
Endgeschwindigkeiten \hat{v}_{end} Plattenseparation		0,1 bis 0,9 m · s ⁻¹	
Oberflächen			
Obere Platte	Glas	Vollfläche	
Untere Platte	Druckform (Flexodruck)	Steg (Länge 15 mm, Breite 0,75 mm)	
		Rasterweite	48 Linien/cm
			60 Linien/cm
		Rasterwinkel	52,5°
			0°
			45,8%
	44,63%		
Flüssigkeit			
Magenta 36-2	η_{110} = 1300 mPas	σ_L = 14,65	mN/m
Magenta 39-6	η_{110} = 3000 mPas	σ_L = 28,09	mN/m
Flüssigkeitsmenge	2,25 µl		
Highspeed-Kamera			
Bildrate (fps)	8.000		
Auflösung	768 x 640		
Verschlusszeit (shutter)	1 / 15.000 sec.		
Makro-Objektiv	Canon MACRO 100 mm		

Tabelle 5.7: Darstellung der gesamten Versuchsparmeter und variierten Größen der dritten Versuchsserie.

Die Dosierung der Flüssigkeit bei der dritten Versuchsserie erfolgt wie in der zweiten Versuchsserie. Eine Erhöhung der Auflösung auf 768 x 640 Bildpunkte wird vorgenommen, um die entstehenden Phänomene detaillierter beobachten zu können. Die Bildrate wird von 20.000 auf 8.000 herabgesetzt. Grund hierfür ist die Vernachlässigung der zeitlichen Auflösung des Filamentabrisses und die detaillierte Beobachtung der Filamentausbildung.

Für diese Arbeit werden 2200 Farbspaltungsversuche mit strukturierten Oberflächen durchgeführt. Die vorgestellten Versuchsserien stellen mit ca. 1400 Versuchen den größten Teil der wissenschaftlichen Experimente dar. Von diesen werden zur Analyse, der bei der Farbspaltung auftretenden Phänomene, nur ca. 140 in dieser Arbeit vorgestellt.

Die Ergebnisse der drei Versuchsserien, die dabei auftretenden Phänomene der Farbspaltung und die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden im folgenden Kapitel dargestellt.

6. Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die experimentellen Ergebnisse dieser Arbeit vorgestellt, die bei den Versuchen der Farbspaltung an strukturierten Oberflächen entstanden. Gerade unter der Anwendung von einem strukturierten Linienkontakt in Kombination mit nicht-Newton'schen Flüssigkeiten ergeben sich besondere Phänomene, die so in der Wissenschaft und bei der Farbspaltung noch nicht beobachtet wurden. Durch eine bei den Experimenten durchgeführten Parameterstudie, werden einzelne Einflussgrößen der Farbspaltung erkannt und diskutiert. Diese Einflussgrößen werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt. Zunächst wird auf die Ergebnisse der ersten Versuchsserie eingegangen. Aus einer Vielzahl an Versuchen und der Variation von Parametern werden unterschiedlichste Phänomene bei der Farbspaltung beobachtet. Diese Phänomene der Farbspaltung werden in dem folgenden Abschnitt gezeigt.

6.1 Phänomene der Farbspaltung

Der Begriff „Phänomen“ kommt aus dem altgriechischen und bedeutet so viel wie die „wahrgenommene Erkenntnistheorie auf Grundlage einer Erscheinung“ [APE11], [KÖN10]. Phänomene, die bei der Farbspaltung in dieser Arbeit entstehen, werden mit der Highspeed-Kamera aufgenommen. Dadurch wird eine Vielzahl von Farbspaltungsvorgängen festgehalten. Einen Überblick über mögliche Phänomene, die bei den Experimenten zur Farbspaltung auftreten, zeigt die folgende Abbildung.

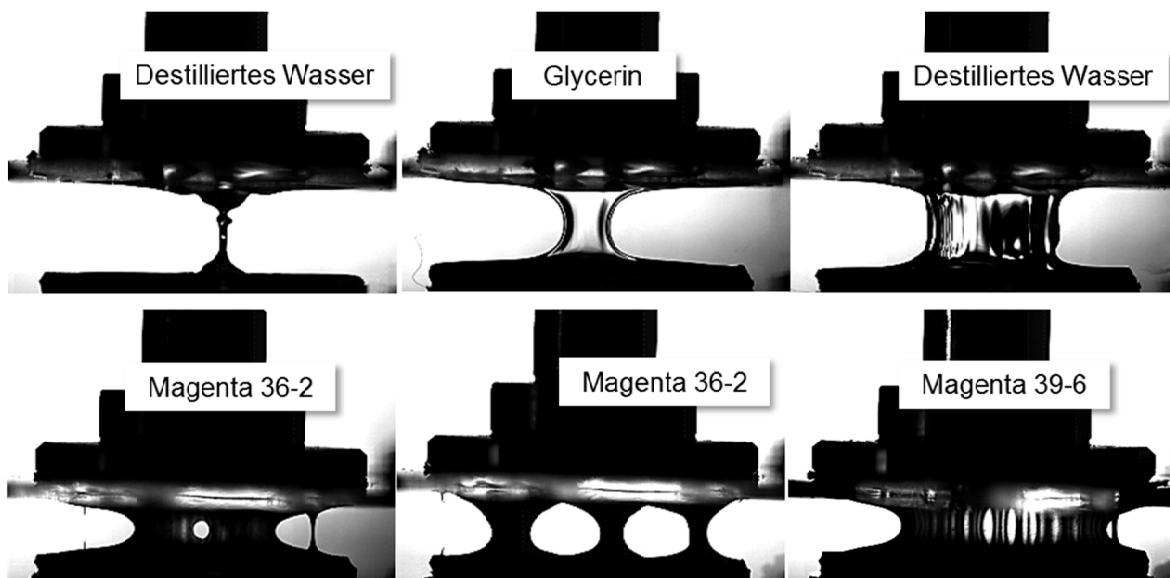


Abbildung 6.1: Ausschnitt über auftretende Phänomene der Farbspaltung (Flüssigkeitsspaltung) unter Anwendung eines strukturierten Linienkontakts.

Die Bilder in Abbildung 6.1 sind nur Ausschnitte aus den Videoaufnahmen der Highspeed-Kamera und sollen an dieser Stelle einen Einstieg in die Vielfalt an Phänomenen geben, die bei der Farbspaltung auftreten. Die Bilder entstanden zum Teil in der ersten

Versuchsserie dieser Arbeit, deren Parameter unter Kapitel 5.3.3 zu finden sind. Dabei wird die Flüssigkeit, die Flüssigkeitsmenge, die Endgeschwindigkeit der Plattenseparation und die Oberflächenstrukturierung (Ist-Tonwert) der Druckform variiert. Ein weiterer Teil der Bilder in Abbildung 6.1 sind in der zweiten und dritten Versuchsserie entstanden und werden in Kapitel 6.2 und 6.3 behandelt.

Bei der Vielzahl an Experimenten werden bestimmte Phänomene immer wieder beobachtet. Diese zeigen sich bei ganz unterschiedlichen Parametern. Damit die unterschiedlichen Abläufe der Farbspaltung unterschieden werden können, werden in dieser Arbeit diese Phänomene schematisch dargestellt und diskutiert. Die ersten Phänomene, die hier vorgestellt werden, sind die Filament- und Hautbildung, die in dem folgenden Abschnitt behandelt werden.

6.1.1 Filament- und Vorhangbildung

Die Filamentbildung tritt bei allen Versuchen dieser Arbeit auf. Durch das Einschnüren der Flüssigkeit bei voranschreitender Separation der Platten bildet sich ein Filament aus. Es kann sich hierbei um ein Filament oder mehrere Filamente handeln. An dieser Stelle wird beispielhaft auf die Entstehung von einem Filament eingegangen (s. Abb. 6.2).

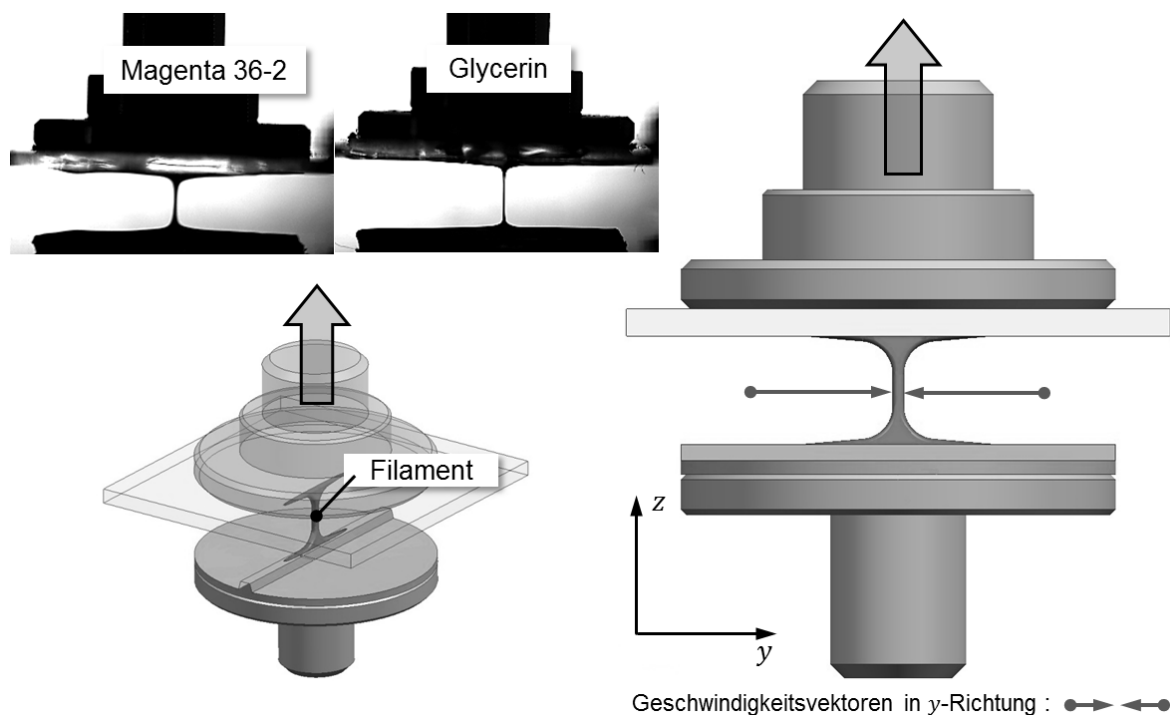


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung der Filamentbildung der Flüssigkeit bei der Plattenseparation und den Beispielbildern von Magenta 36-2 und Glycerin.

Bei den zwei Videoausschnitten in Abbildung 6.2 wird mit der Separation der Platten eine Einschnürung erkennbar, die zu einem Filament führt. Hierbei wird die Flüssigkeit über die Länge des Stegs der Druckform eingeschnürt. Zur Verdeutlichung der Bewegung dienen die Vektorpfeile der Geschwindigkeit in y -Richtung (s. Abb. 6.2).

Ursachen für die Filamentbildung ist z. B. das nicht-viskoelastische Verhalten von Flüssigkeiten. Eine weitere mögliche Ursache ist die Strukturierung der Druckform, die das Einschnüren des Filaments begünstigt.

Eine weitere Beobachtung, die sich häufig im Zusammenhang mit der Filamentbildung erkennen lässt, ist die Vorhangbildung. Der Begriff „Vorhang“ (engl. Curtain) wird in der Druckbranche im Bereich Beschichten (engl. Coating) verwendet. Der Begriff Vorhangbildung wird in dieser Arbeit neu definiert. Anders als die Filamentbildung aus Abbildung 6.2 gibt es eine verzögerte Filamentbildung (s. Abb. 6.3). Hierbei entsteht zunächst ein Flüssigkeitsvorgang. Zur Verdeutlichung der Vorhangbildung dient Abbildung 6.3. Die Vorhangbildung führt verzögert zu der Bildung eines Filaments und spannt einen Flüssigkeitsvorhang auf (s. Abb. 6.3).

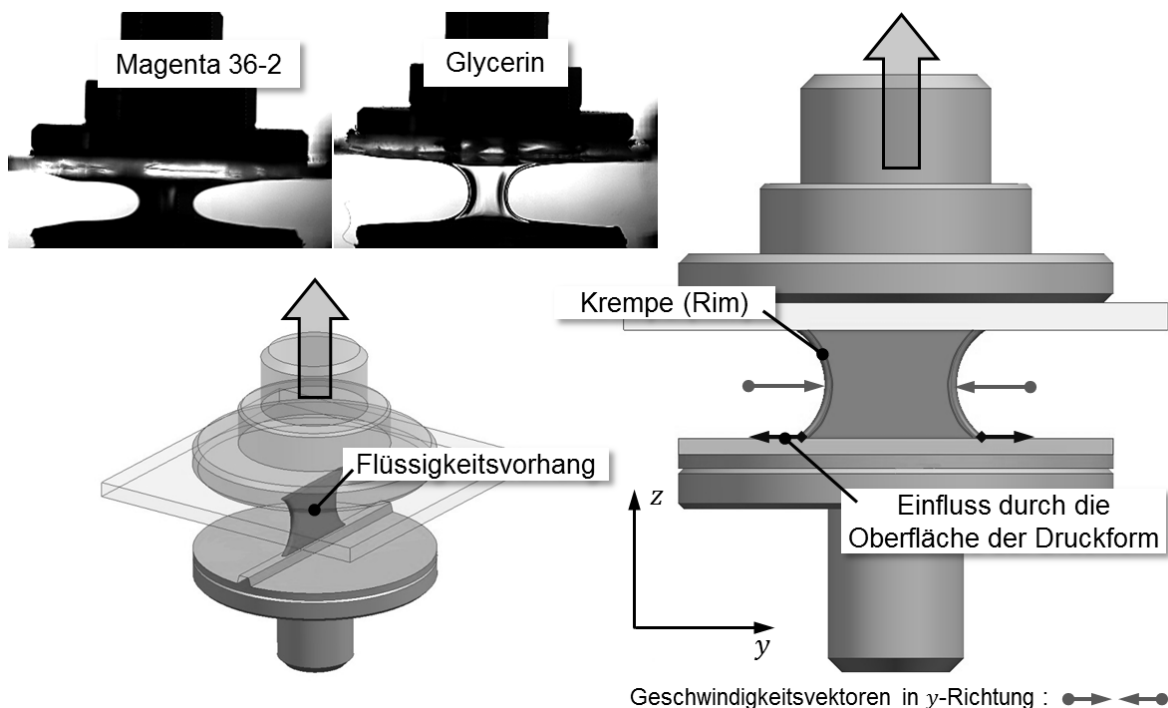


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung der Vorhangbildung der Flüssigkeit bei der verzögerten Einschnürung von einem Filament und die Beispielbilder von Magenta 36-2 und Glycerin.

Die Flüssigkeit wird in Abbildung 6.3 an der Einschnürung bzw. an der Filamentbildung gehindert. Dies kann an dem Einfluss der Oberfläche der Druckform liegen. Allerdings zeigt sich auf der Glasoberfläche ein ähnliches Verhalten. In den Versuchen dieser Arbeit wird festgestellt, dass sich die Bewegung der Flüssigkeit an der Glasoberfläche gleich der Bewegung auf der Druckform verhält.

Bei der Entstehung des Flüssigkeitsvorhangs wird beobachtet, dass sich außen an der Kontur des Vorhangs eine Krempe (engl. Rim) bildet (s. Abb. 6.3). Dieses Phänomen wird in einigen wissenschaftlichen Arbeiten diskutiert. Beispiele hierfür sind die Untersuchungen von CULICK [CUL60], TAYLOR [TAY59] und ROISMAN [ROI10]. Auf die Bewegung der Krempe wird in Kapitel 6.2.2 vertieft eingegangen.

Der sich bildende Flüssigkeitsvorhang in Abbildung 6.3 führt bei der weiteren Plattenseparation entweder zur Filamentbildung oder es entsteht ein weiteres Phänomen, das der Lamellenbildung.

6.1.2 Lamellenbildung

Nach der Bildung des Flüssigkeitsvorhangs können sich Instabilitäten im Vorhang ausbilden, die sich durch Lamellen zeigen (s. Abb. 6.4). Der Begriff Lamelle wird in dieser Arbeit als die auftretende Form an vielen kleinen Filamenten zwischen denen sich kleine Flüssigkeitshäute aufspannen definiert. Die Zahl und Größe der Lamellen kann je nach Flüssigkeit unterschiedlich sein. Die folgende Abbildung verdeutlicht diesen Zusammenhang.

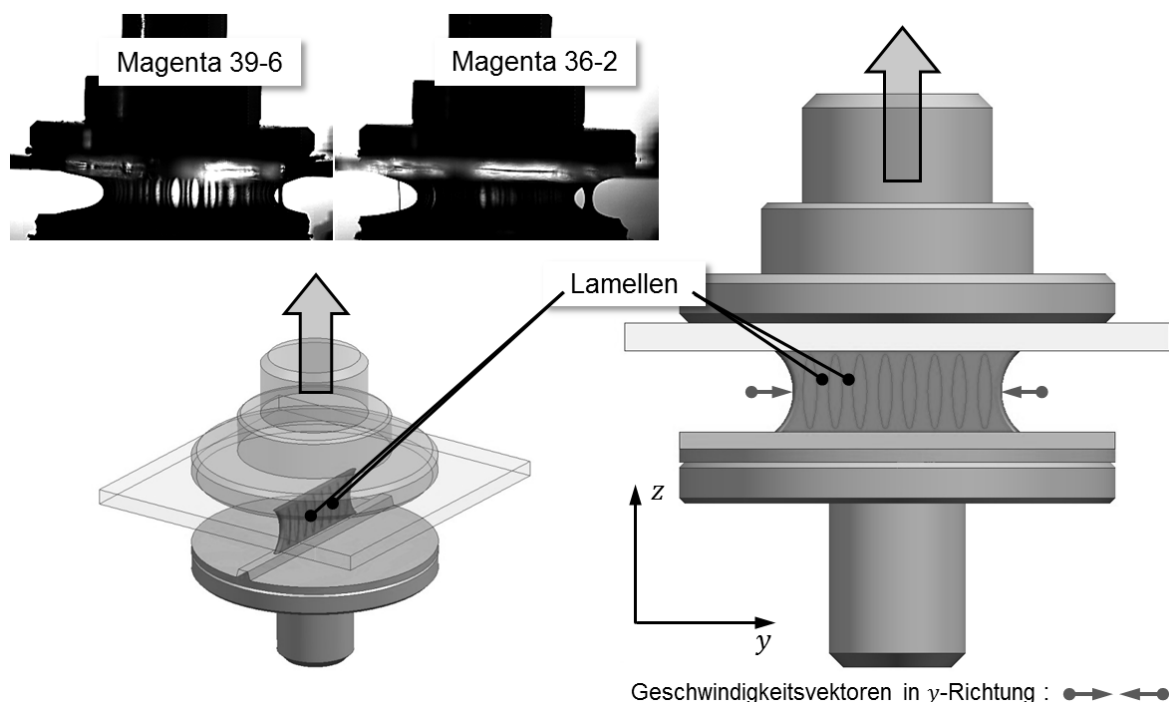


Abbildung 6.4: Schematische Darstellung der Bildung von Instabilität bzw. Lamellen in einem Flüssigkeitsvorhang und die Beispielbilder von Magenta 39-6 und Magenta 36-2.

In Abbildung 6.4 sind zwei Ausschnitte der Videoaufnahmen der Highspeed-Kamera als Beispiele dargestellt. Es handelt sich hierbei um die UV-Farben Magenta 39-6 und Magenta 36-2. Bei Magenta 39-6 in Abbildung 6.4 sind dünne Flüssigkeitshäute zu sehen, durch die das Licht der Beleuchtungseinheit scheint.

In wenigen Fällen kann es nach der Bildung von Lamellen auch direkt zur Einschnürung und der Bildung eines Filaments kommen. Häufig wird allerdings beobachtet, dass bestimmte Lamellen größer werden, während andere Lamellen sich verkleinern und zusammenziehen. Das folgende Beispiel in Abbildung 6.5 zeigt ein solches Verhalten. Eine Lamelle vergrößert sich und spannt eine Flüssigkeitshaut auf, während sich die übrigen Lamellen zusammenziehen. Dabei bilden sich in dem Beispiel in Abbildung 6.5 zwei Flüssigkeitssäulen aus (s. Abb. 6.5). Die Entstehung von Flüssigkeitssäulen wird in dieser Arbeit als Säulenbildung definiert, da dieses Phänomen in keinem ähnlichen wissenschaftlichen Zusammenhang bisher erklärt noch definiert wurde.

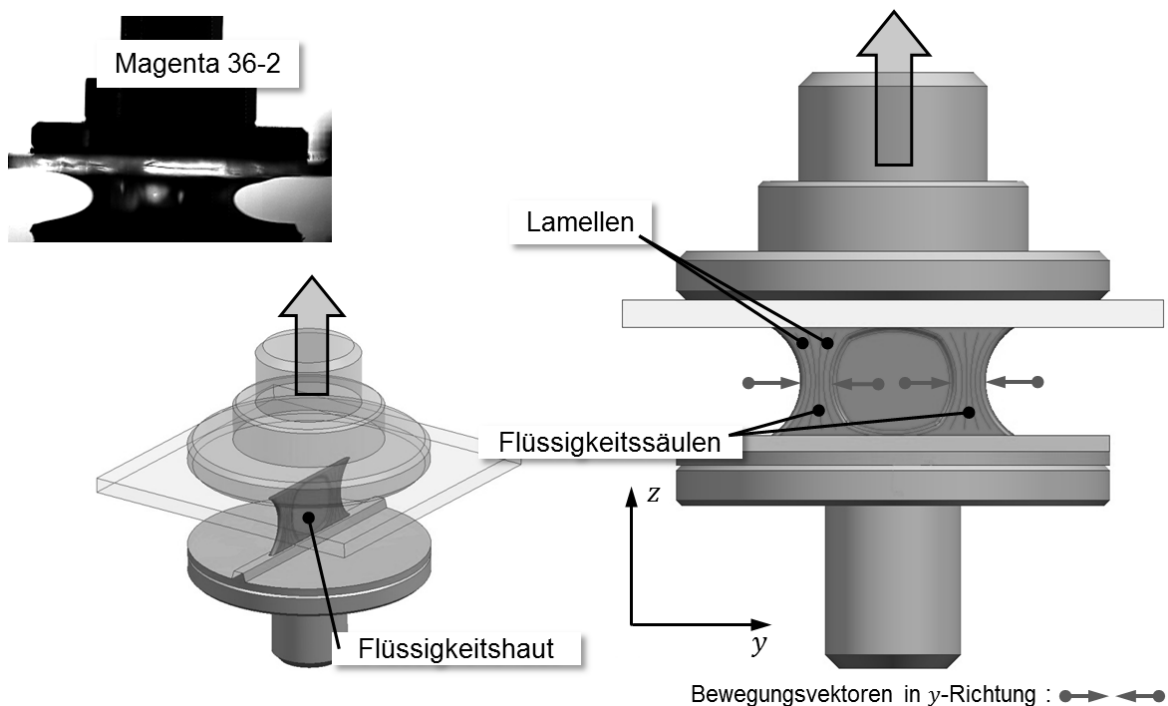


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung der Bildung von zwei Flüssigkeitssäulen und das Beispielbild von Magenta 36-2.

Bei der Säulenbildung in Abbildung 6.5 wird die dazwischen aufgespannte Flüssigkeitshaut immer dünner. Es wird beobachtet, dass im Zuge der Säulenbildung ein Aufreißen des Flüssigkeitsvorhangs stattfindet.

Anders als in Abbildung 6.5 kann es auch zu der Bildung mehrerer Flüssigkeitssäulen kommen. Dabei ziehen sich die Lamellen ebenfalls zu Flüssigkeitssäulen zusammen. Es bilden sich mehrere dazwischen aufgespannte Flüssigkeitshäute. Abbildung 6.6 verdeutlicht diesen Zusammenhang am Beispiel von drei Flüssigkeitssäulen.

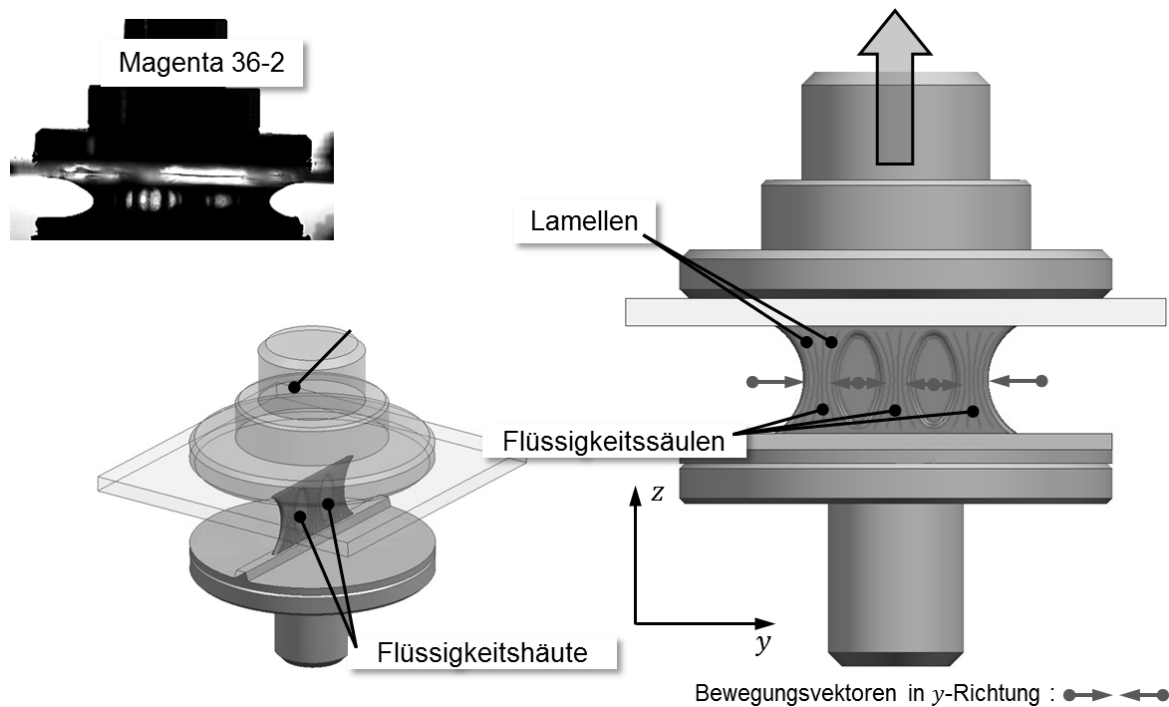


Abbildung 6.6: Schematische Darstellung der Bildung von drei Flüssigkeitssäulen und das Beispielbild von Magenta 36-2.

Bei der schematischen Darstellung in Abbildung 6.6 entstehen zwei Flüssigkeitshäute. Die Bewegungsvektoren in y -Richtung zeigen die Einschnürung der Säulen und die Bildung der Flüssigkeitshäute. Dabei zeigt das Beispiel in Abbildung 6.6 die Vergrößerung zweier Lamellen, wobei sich drei Flüssigkeitssäulen ausbilden. Ein Aufriss der Flüssigkeitshäute hat noch nicht stattgefunden. Auf den Aufriss dieser Flüssigkeitshäute wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

6.1.3 Hautaufriss

Bei der Bildung von Flüssigkeitssäulen und den dazwischen liegenden Flüssigkeitshäuten kommt es bei fortschreitender Plattenseparation zum Aufriss der Häute. Dies wird in dieser Arbeit als Hautaufriss definiert. Hierbei bildet sich ein kleiner Riss in der Flüssigkeitshaut. Zur Veranschaulichung dieses Vorgangs dient Abbildung 6.7, welche den Hautaufriss schematisch dargestellt. Die Flüssigkeitshaut wird nach der Bildung eines Risses instabil und schnürt sich zu den Flüssigkeitssäulen ein. Es wird vermutet, dass sich bei dem Aufreißen der Flüssigkeitshaut ebenfalls wie in Kapitel 6.1.1 eine Krempe (Rim) bildet, die allerdings aufgrund der hohen Dynamik des Aufreißvorgangs bei den Experimenten nicht beobachtet werden konnte (s. Abb. 6.7).

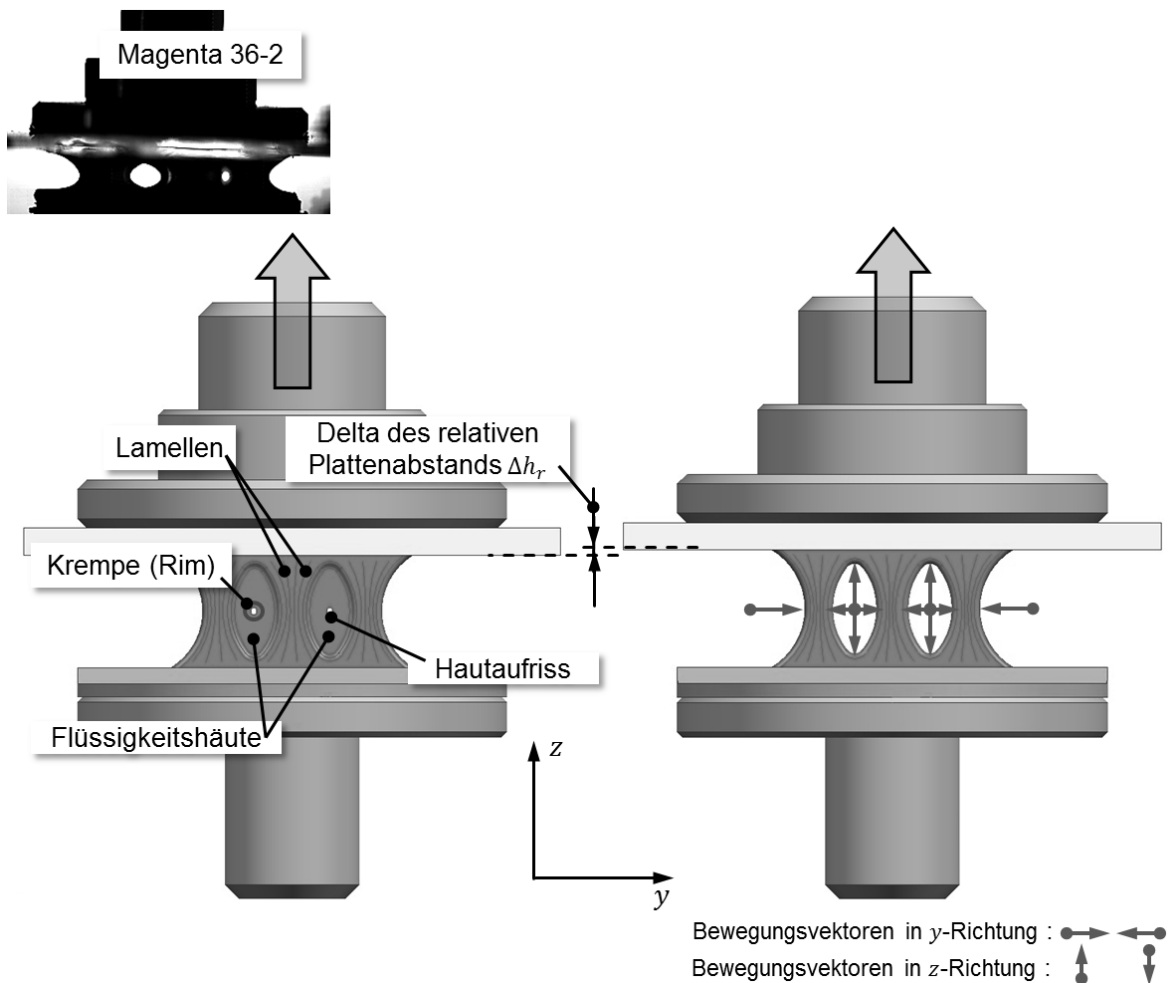


Abbildung 6.7: Schematische Darstellung des Hautaufrisses bei drei Flüssigkeitssäulen und das Beispielbild von Magenta 36-2.

Die Flüssigkeitshäute sind in der Regel nicht gleich groß, was das Beispielbild in Abbildung 6.7 demonstriert. Sie besitzen unterschiedliche Dicken und reißen dadurch nicht gleichzeitig, sondern zeitlich versetzt auf. Dies bewirkt eine Verschiebung der Symmetrie der Säulen und die Bildung von Flüssigkeitssäulen unterschiedlicher Dicke. Eine gezielte Auswertung des Hautaufrisses von Druckfarben wird in Kapitel 6.2.1 untersucht. Durch den Hautaufriss bilden sich Filamente, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

6.1.4 Filamentabriss

Durch den Hautaufriss bilden sich aus den Flüssigkeitssäulen Filamente aus. Bei diesem Vorgang können die Filamente noch Lamellen besitzen. Mit fortschreitender Separation der Platten verschwinden diese Lamellen in den Filamenten. Ähnliche Verhaltensweisen zeigen Untersuchungen von RASMUSSEN und HASSAGER [RAS74] bei Filamenten von Polymerlösungen. Abbildung 6.8 zeigt beispielhaft den Abriss von drei Filamenten. Die Filamente schnüren sich mit fortschreitendem Plattenabstand immer weiter ein, bis es zum Filamentabriss kommt (s. Abb. 6.8).

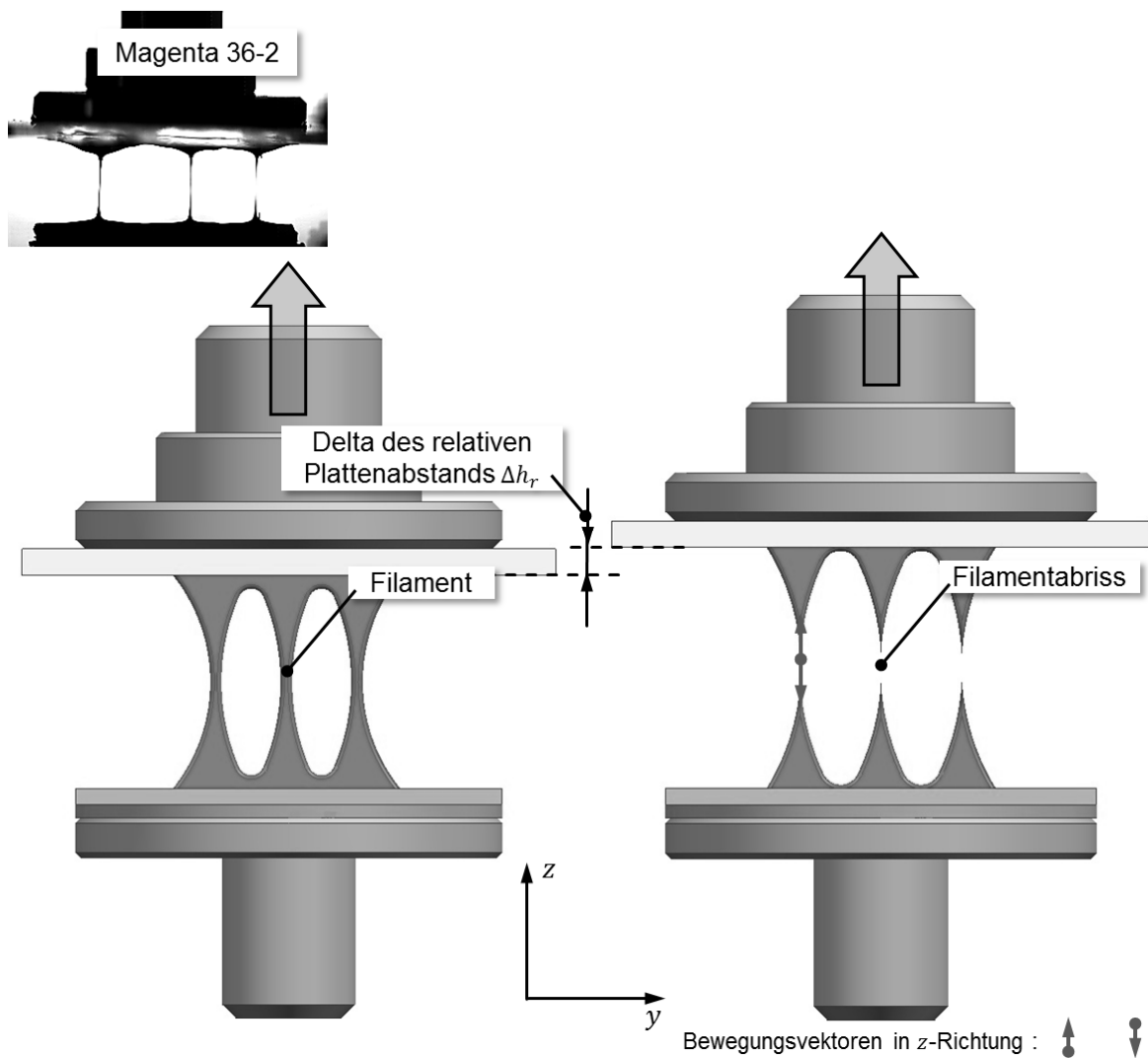


Abbildung 6.8: Schematische Darstellung des Filamentabriss bei drei Filamenten und das Beispielbild von Magenta 36-2.

Beim Filamentabriss ziehen sich die Filamentenden zusammen. Durch die unterschiedliche Dicke der Filamente reißen die Filamente zeitlich versetzt. Dies liegt daran, dass eine größere Flüssigkeitsmenge im Filament vorliegt. Diese braucht daher mehr Zeit um das Filament einzuschnüren. In Kapitel 6.2.2 dieser Arbeit wird der Filamentabriss genauer untersucht.

Im folgenden Abschnitt wird die komplexe Abfolge der bisher vorgestellten Phänomene untersucht.

6.1.5 Komplexe Abfolge von Phänomenen

Die in Abschnitt 6.1.1 bis 6.1.4 gezeigten Phänomene geben einen kleinen Einblick in die Farbspaltung und deren Komplexität. Durch die bisher dargestellten Phänomene wird deren Entstehung nicht ersichtlich. Einen Überblick über die beobachteten Phänomene und deren Abfolge zeigen die Ausschnitte der Highspeed-Aufnahmen im Anhang dieser Arbeit. Die schematische Abfolge der Phänomene wird in Abbildung 6.9 dargestellt.

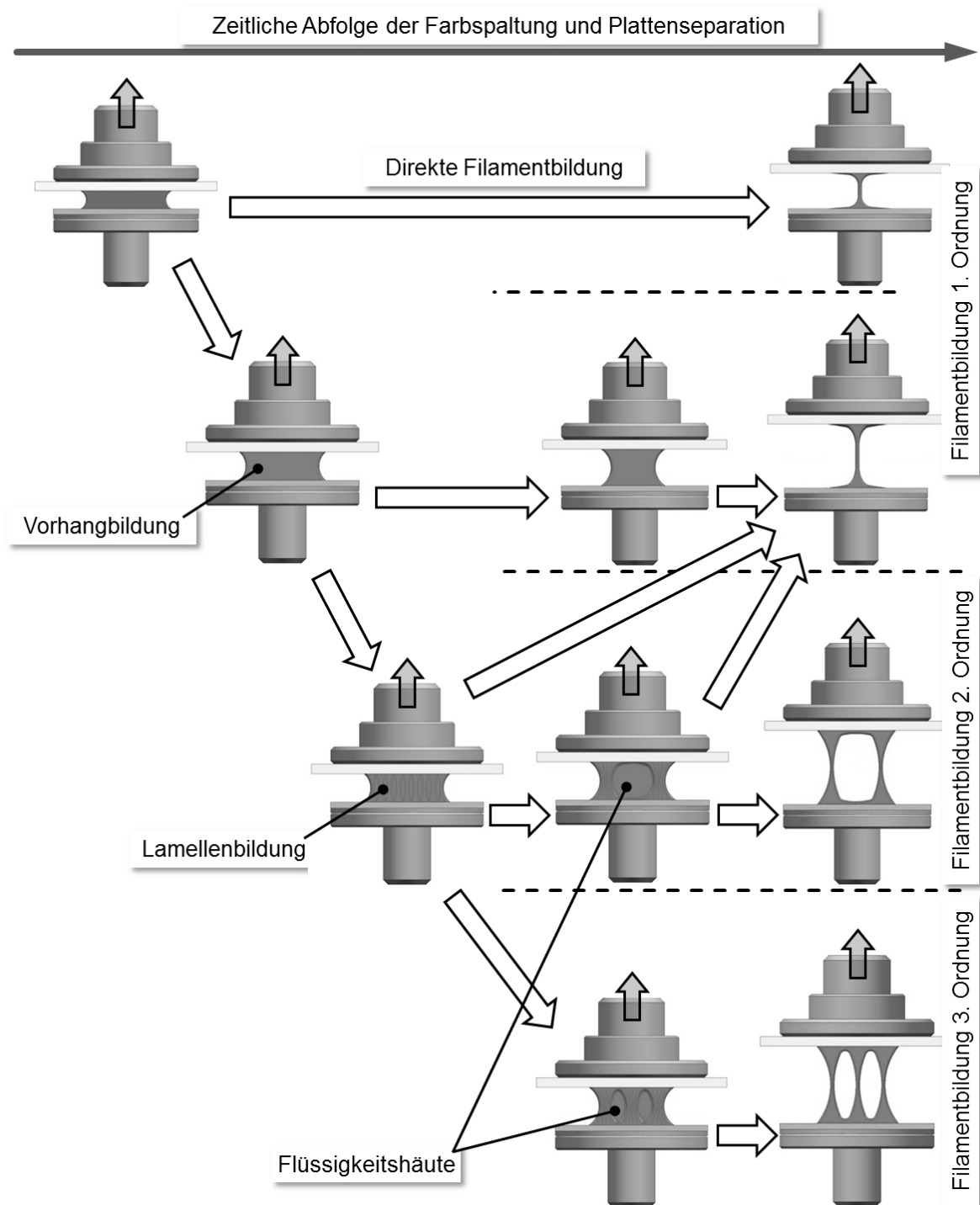


Abbildung 6.9: Abfolgediagramm von Phänomenen bei der Farbspaltung.

Abbildung 6.9 zeigt die zeitliche Abfolge der Farbspaltung und der Plattenseparation sowie die grundsätzlichen Phänomene bei der Filamentbildung. Die Filamentbildung wird hier durch die Anzahl der sich bildenden Filamente als höhere Ordnungen definiert. Bei der Plattenseparation wird die dazwischen befindliche Flüssigkeit über die Länge des Stegs eingeschnürt. Hierbei gibt es zwei grundsätzliche Unterscheidungsmerkmale. Entweder die Flüssigkeit schnürt direkt ein und es bildet sich nur ein Filament aus (direkte Filamentbildung erster Ordnung), oder es kommt zur Entstehung eines Flüssigkeitsvorhangs (s. Abb. 6.9). Diese beiden Verhaltensweisen werden z. B. bei Glycerin in Abhängigkeit von Separationsgeschwindigkeit und Flüssigkeitsmenge in der ersten Versuchsserie dieser Arbeit beobachtet. Ausschnitte hierzu sind im Anhang zu finden.

Bei weiterer Betrachtung der zeitlichen Abfolge kommt es nach der Bildung des Flüssigkeitsvorhangs zu zwei weiteren Verhaltensweisen. Hier kann sich zeitlich verzögert ein Filament (erster Ordnung) bilden oder es entstehen Lamellen im Flüssigkeitsvorhang (s. Abb. 6.9). Die Lamellenbildung selbst kann ebenfalls zur Einschnürung und der Bildung eines Filaments (erster Ordnung) führen. Häufig wird bei Druckfarben ein anderer Zusammenhang beobachtet. Die Lamellen ziehen sich zu Flüssigkeitssäulen zusammen und spannen Flüssigkeitshäute zwischen sich auf. Dabei bilden sich je nach Grad der Ordnung eine Anzahl an Säulen aus, die sich durch den Hautaufriss zu Filamenten entwickeln (zweiter und dritter Ordnung).

Abbildung 6.9 zeigt die Abfolge von Phänomenen der Farbspaltung, wie sie in dieser Arbeit beobachtet werden – es besteht jedoch kein Anspruch auf Vollständigkeit. So können weitere Phänomene bei der Farbspaltung entstehen, die in dieser Arbeit nicht erfasst werden. Die schematische Darstellung der Abfolge von Phänomenen in Abbildung 6.9 liegt in Realität nicht so ideal vor wie hier gezeigt. Dennoch lassen sich die gezeigten Abfolgen mit kleinen Unterschieden wiederholt beobachten.

Bei den bisher vorgestellten Phänomenen der Farbspaltung werden Hautaufriss und Filamentabriss erklärt. Durch die Vorversuche und Experimente der ersten Versuchsserie wird festgestellt, dass bestimmte Parameter einen Einfluss auf die zeitliche Entstehung des Hautaufriss und den Filamentabriss haben. Um dies wissenschaftlich zu untersuchen, entstand die zweite Versuchsserie, bei der die Strukturierung der Druckform und die Separationsgeschwindigkeit variiert werden. Im folgenden Kapitel wird die Methode zur Auswertung des Hautaufrisses und deren Ergebnisse vorgestellt.

6.2 Einfluss von Tonwert und Separationsgeschwindigkeit

Im vorliegenden Abschnitt wird die zweite Versuchsserie dieser Arbeit vorgestellt. Dabei ist es das Ziel, den Einfluss der strukturierten Oberfläche der Druckform und der Separationsgeschwindigkeit auf die Farbspaltung zu untersuchen. Hierzu wird der Ist-Tonwert der Druckform variiert und dessen Einfluss auf den Hautaufriss und der Filamentabriss beobachtet. Wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben werden die Ist-Tonwerte bei 100 %; 64,58 %; 37,65 % und 2,23 % untersucht. Die Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation erfolgt wie in den ersten zwei Versuchsserien von 0,1 bis $0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in Schritten von $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

6.2.1 Bestimmung des Hautaufrisses

In diesem Abschnitt wird der Hautaufriss bei verschiedenen Ist-Tonwerten in Abhängigkeit der Separationsgeschwindigkeit untersucht. Als Größen der Betrachtung wird der relative Plattenabstand h_r und der Zeitpunkt t_s des Hautaufrisses betrachtet. Abbildung 6.10 verdeutlicht den Hautaufriss bei einem bestimmten relativen Plattenabstand.

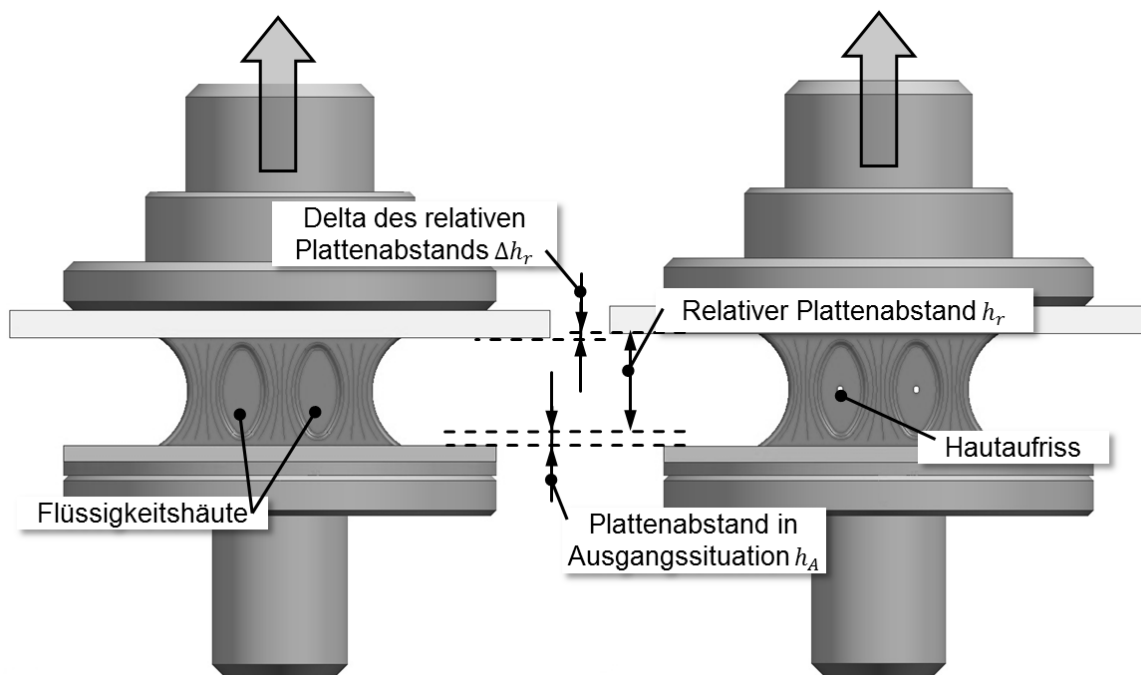


Abbildung 6.10: Schematische Darstellung des Hautaufriss bei einem bestimmten relativen Plattenabstand.

Hierzu wird die Druckfarbe Magenta 36-2 und eine konstante Flüssigkeitsmenge von $2,25 \mu\text{l}$ verwendet. Die Druckform hat eine Rasterweite von 48 Linien/cm. Andere Größen finden sich in den Versuchsparametern der zweiten Versuchsserie unter Kapitel 5.3.2.

Als Referenz der Ergebnisse der zweiten Versuchsserie dient der Hautaufriss bei einem Ist-Tonwert von 100 %. Hier wird die geometrische Oberfläche der Druckform im Vergleich zu den anderen Tonwerten als hydraulisch glatt betrachtet.

Hautaufriss bei einem Ist-Tonwert von 100 %:

Bei einem Ist-Tonwert von 100 %, der als Referenz für die folgenden Versuche verwendet wird, zeigen sich bei der Änderung der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation Unterschiede in der Filamentausbildung. Abbildung 6.11 zeigt die direkte und zeitverzögerte Filamentbildung erster Ordnung bei $\hat{v}_{end} = 0,1$ und $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ sowie die Filamentbildung zweiter Ordnung nach dem Hautaufriss bei $\hat{v}_{end} = 0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Der relative Plattenabstand h_r ist bei allen drei Videoausschnitten der Highspeed-Aufnahmen gleich (s. Abb.6.11).

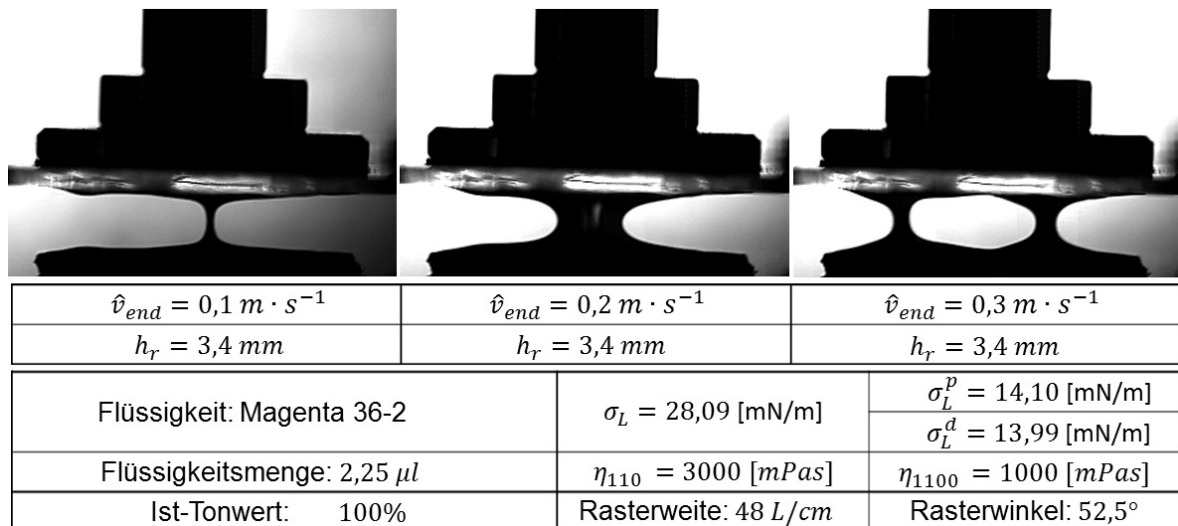


Abbildung 6.11: Videoausschnitte der Filamentbildung bei einem Ist-Tonwert von 100 %.

In der aufgeführten Tabelle unter den drei Videoausschnitten in Abbildung 6.11 sind die Eigenschaften der angewandten Druckfarbe und der Druckform aufgeführt. Bei einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zeigt sich in Abbildung 6.11, dass sich ein Flüssigkeitsvorhang bildet, der sich zeitverzögert zu $\hat{v}_{end} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ einschnürt. Erst ab einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ reißt die Flüssigkeitshaut in Abbildung 6.11 auf und es bilden sich zwei Filamente. Bei $\hat{v}_{end} = 0,3$ bis $0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zeigt sich die Bildung von zwei Filamenten. Um die Entstehung von zwei Filamenten zu analysieren, wurde der Augenblick des Hautaufrisses bestimmt. Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhangs dient die folgende Abbildung 6.12. Hier wird der relative Plattenabstand h_r und der Zeitpunkt t_s , bei denen der Hautaufriss stattfindet, über der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation dargestellt.

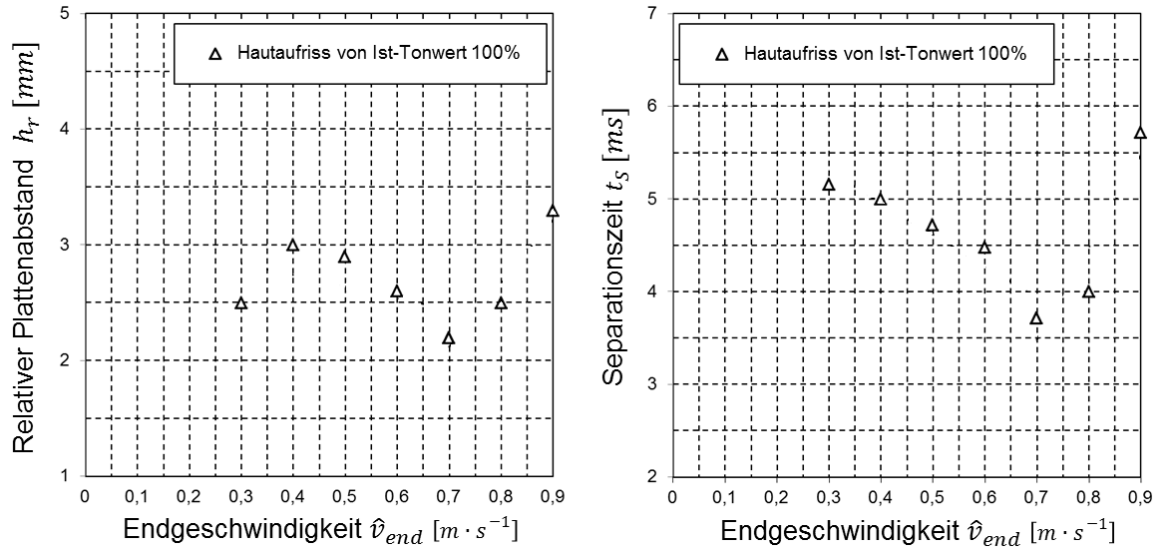


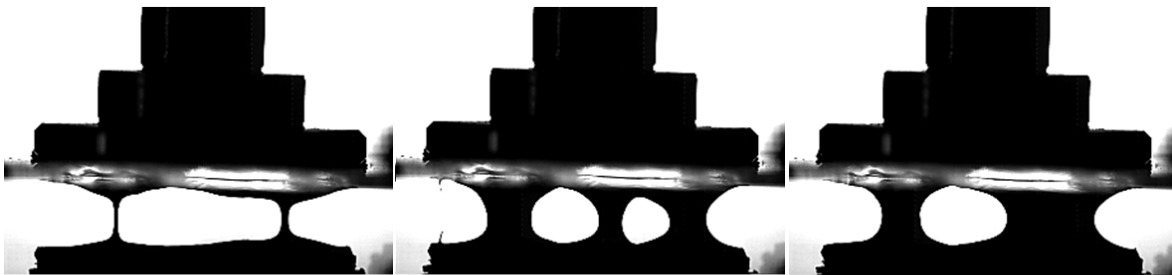
Abbildung 6.12: Hautaufriss bei einem Ist-Tonwert von 100 %.

Aus den Videoausschnitten der Highspeed-Aufnahmen wird der jeweilige relative Plattenabstand und die Separationszeit des Hautaufrisses ermittelt und in Abbildung 6.12 aufgetragen. Dabei zeigen die Verläufe den Hautaufriss der Flüssigkeitshaut mit Zunahme der Endgeschwindigkeiten. Der Hautaufriss in Abbildung 6.12 liegt zwischen einem relativen Plattenabstand h_r von 2 bis 4 mm. Bei genauer Betrachtung des Verlaufs des Hautaufrisses über der Endgeschwindigkeit der Separationsplatten zeigt sich bei $\hat{v}_{end} = 0,7 m \cdot s^{-1}$ ein Minimum und somit ein früherer Hautaufriss. Es wird vermutet, dass durch den Vorgang der Plattenseparation mit einer bestimmten Endgeschwindigkeit eine bestimmte Scherviskosität in den sich bildenden Filamenten vorliegt, die einen früheren Aufriss begünstigen.

Hautaufriss bei einem Ist-Tonwert von 64,58 %:

Bei den folgenden Untersuchungen wird eine Druckform mit einem Ist-Tonwert von 64,58 % verwendet. Bei gleichbleibenden Parametern wird nur der Ist-Tonwert geändert. Hierbei zeigt sich bei den Endgeschwindigkeiten $\hat{v}_{end} = 0,1$ bis $0,9 m \cdot s^{-1}$ der Plattenseparation ein deutlicher Unterschied zu den Ergebnissen als bei einem Ist-Tonwert von 100 %. Es kommt zu einer differenten Ausbildung der Filamente (s. Abb. 6.13). Es wird verifiziert, dass die Oberflächenstrukturierung der Druckform einen Einfluss auf die Filamentbildung hat. Es zeigt sich bei dem Experiment, dass sich vor den gezeigten Videoausschnitten in Abbildung 6.13 bei allen Endgeschwindigkeiten erst ein Flüssigkeitsvorhang mit Lamellen bildet. Bei einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,1 m \cdot s^{-1}$ bilden sich zwei Filamente aus. Ab einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,2 m \cdot s^{-1}$ entstehen drei Filamente. Was bei dem Übergang von $\hat{v}_{end} = 0,1$ zu $0,2 m \cdot s^{-1}$ passiert und die Ordnung der Filamentbildung beeinflusst, ist nicht eindeutig. Die folgende

Abbildung zeigt drei Videoausschnitte der Highspeed-Aufnahmen und die angewandten Parameter des Experiments in der dazugehörigen Tabelle.



$\hat{v}_{end} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\hat{v}_{end} = 0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\hat{v}_{end} = 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
$h_r = 3,4 \text{ mm}$	$h_r = 3,4 \text{ mm}$	$h_r = 3,4 \text{ mm}$
Flüssigkeit: Magenta 36-2	$\sigma_L = 28,09 \text{ [mN/m]}$	$\sigma_L^p = 14,10 \text{ [mN/m]}$
Flüssigkeitsmenge: $2,25 \mu\text{l}$	$\eta_{110} = 3000 \text{ [mPas]}$	$\sigma_L^d = 13,99 \text{ [mN/m]}$
Ist-Tonwert: 64,58%	$\eta_{1100} = 1000 \text{ [mPas]}$	$\eta_{1100} = 1000 \text{ [mPas]}$
	Rasterweite: 48 L/cm	Rasterwinkel: $52,5^\circ$

Abbildung 6.13: Videoausschnitte der Filamentbildung bei einem Ist-Tonwert von 64,58 %.

In Abbildung 6.13 ist zu sehen, dass sich bei unterschiedlichen Endgeschwindigkeiten unterschiedliche Filamente durch den Hautaufriss bilden. Ab einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ entstehen wieder zwei Filamente, die sich in Abbildung 6.13 als Flüssigkeitsvorhänge darstellen. Warum die Ordnung der Filamentbildung wieder abnimmt, ist nicht geklärt.

Im Anfangszustand der Plattenseparation treten bei unterschiedlichen Beschleunigungen andere Scherviskositäten auf. Bei der Druckfarbe Magenta 36-2 zeigt sich schon bei niedriger Schergeschwindigkeit eine starke Abnahme der Scherviskosität (s. Abb. 4.11). Mögliche Ursache ist, dass die vorliegende Scherviskosität die Filamentbildung beeinflusst. Einen ähnlichen Sachverhalt diskutiert PETRIE [PET06] bezüglich des Dehnverhaltens von Flüssigkeiten. Der Einfluss der Oberflächenspannung der Druckfarbe wird zunächst ausgeschlossen, da diese während des gesamten Versuchs als konstant betrachtet werden kann. Eine hohe Scherviskosität im Anfangszustand bewirkt bei einer Beschleunigung zu einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ein schlechteres Nachfließverhalten als bei den übrigen Endgeschwindigkeiten. Es wird daher vermutet, dass die Flüssigkeit durch eine niedrigere Scherviskosität am Nachfließen gehindert wird. Dadurch bleibt ein großer Teil der Druckfarbe auf dem Steg der Druckform haften. Nur ein kleiner Teil der Druckfarbe führt dann zur Filamentbildung, was erklärt, warum die Filamente bei einer Endgeschwindigkeiten $\hat{v}_{end} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ einen geringeren Filamentdurchmesser aufweisen als die der anderen Videoausschnitte. Die Oberflächenstrukturierung kann das Nachfließverhalten zusätzlich beeinflussen. Dies kann ein Grund dafür sein, dass trotz relativ hoher Scherviskosität sich in dem ersten Videoausschnitt in Abbildung 6.11 nur ein Filament ausbildet, da die Oberfläche vergleichsweise als hydraulisch glatt angesehen werden kann.

Betrachtet man den relativen Plattenabstand h_r des Hautaufrisses in Abbildung 6.14, so zeigen sich bei den Endgeschwindigkeiten $\hat{v}_{end} = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis $0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zwei Hautaufrisse und die Bildung von drei Filamenten.

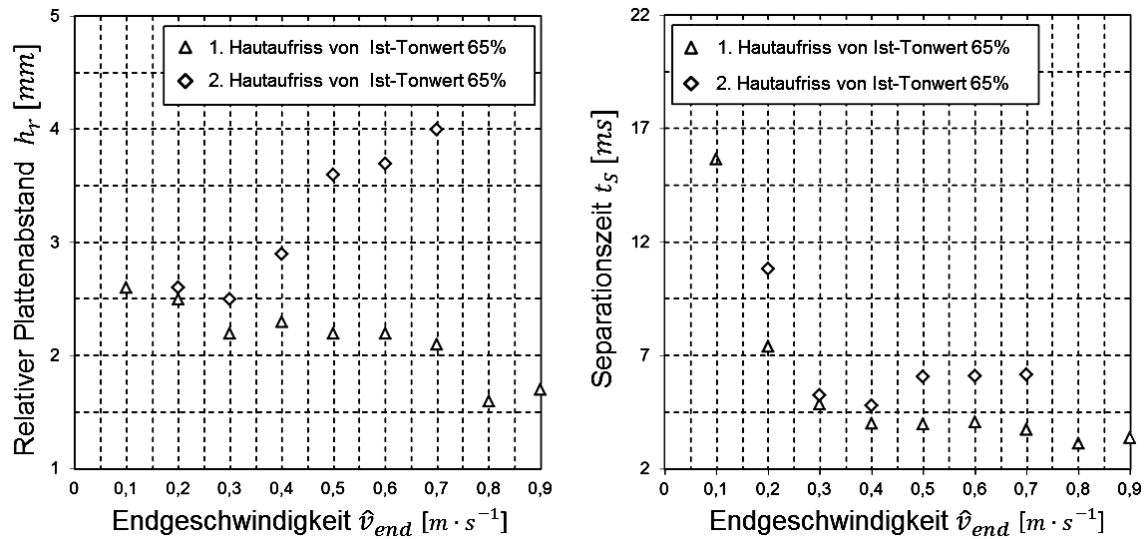


Abbildung 6.14: Hautaufriss bei einem Ist-Tonwert von 64,58 %.

In Abbildung 6.14 ist beim Hautaufriss bezüglich des relativen Plattenabstands ein spezieller Vorgang zu erkennen: Die zwei dargestellten Hautaufrisse driften mit Anstieg der Endgeschwindigkeit auseinander. Während der eine Plattenabstand zunimmt, nimmt der andere ab. Ein Grund hierfür kann die nicht gleichmäßige Verteilung der Druckfarbe auf dem Steg der Druckform sein. Dies ist auch in Abbildung 6.13 bei einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zu sehen. Wieso sich ein solches Verhalten bei wiederholter Versuchsdurchführung einstellt, ist nicht bekannt. Es wird deshalb interpretiert, dass ein Zusammenspiel von strukturierter Oberfläche der Druckform, der vorliegenden Scherviskosität und der Oberflächenspannung der Druckfarbe diesen Zustand begünstigt.

Hautaufriss bei einem Ist-Tonwert von 37,65 %:

Bei einem Ist-Tonwert der Druckform von 37,65 % zeigt sich bei Hautaufriss ein anderes Verhalten als in den zwei Versuchen zuvor. Hier bildet sich zunächst unabhängig von der Endgeschwindigkeiten \hat{v}_{end} ein Flüssigkeitsvorhang mit Lamellen aus. Dieser schnürt sich bei einer Endgeschwindigkeiten $\hat{v}_{end} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ein und bildet nur ein Filament aus (s. Abb. 6.15). Ab Endgeschwindigkeiten $\hat{v}_{end} = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wird eine Flüssigkeitshaut zwischen den Lamellen instabil und reißt auf. Dies geschieht bis zu einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. In Abbildung 6.15 sind die Videoausschnitte der Highspeed-Aufnahmen der Farbspaltung bei unterschiedlichen Endgeschwindigkeiten \hat{v}_{end} dargestellt.

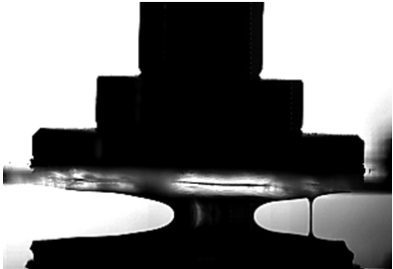
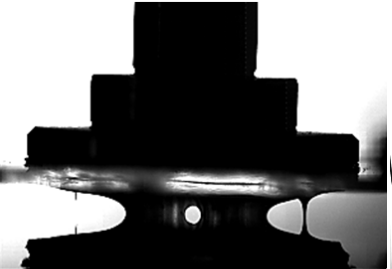
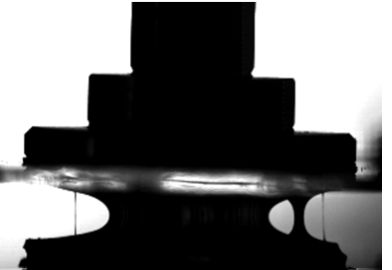
		
$\hat{v}_{end} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\hat{v}_{end} = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\hat{v}_{end} = 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
$h_r = 2,7 \text{ mm}$	$h_r = 2,7 \text{ mm}$	$h_r = 2,7 \text{ mm}$
Flüssigkeit: Magenta 36-2	$\sigma_L = 28,09 \text{ [mN/m]}$	$\sigma_L^p = 14,10 \text{ [mN/m]}$
Flüssigkeitsmenge: $2,25 \mu\text{l}$	$\eta_{110} = 3000 \text{ [mPas]}$	$\sigma_L^d = 13,99 \text{ [mN/m]}$
Ist-Tonwert: 37,65%	Rasterweite: 48 L/cm	$\eta_{1100} = 1000 \text{ [mPas]}$
		Rasterwinkel: $52,5^\circ$

Abbildung 6.15: Videoausschnitte der Filamentbildung bei einem Ist-Tonwert von 37,65 %.

Bei einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zeigt sich in Abbildung 6.15 kein Hautaufriss. Allerdings ist erkennbar, dass der Flüssigkeitsvorhang viel ausgeprägter als bei $\hat{v}_{end} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bei gleichem Plattenabstand aufgespannt wird. Dieses Verhalten des Aufspannens eines Vorhangs ist grundsätzlich ähnlich dem zuvor vorgestellten Versuch mit einem Ist-Tonwert von 64,58 %. Der Versuch mit einem Ist-Tonwert von 37,65 % ist, was die Anzahl der Filamente angeht, einen Grad der Ordnung darunter. Abbildung 6.16 zeigt den Hautaufriss über der Endgeschwindigkeit der Plattenseparation.

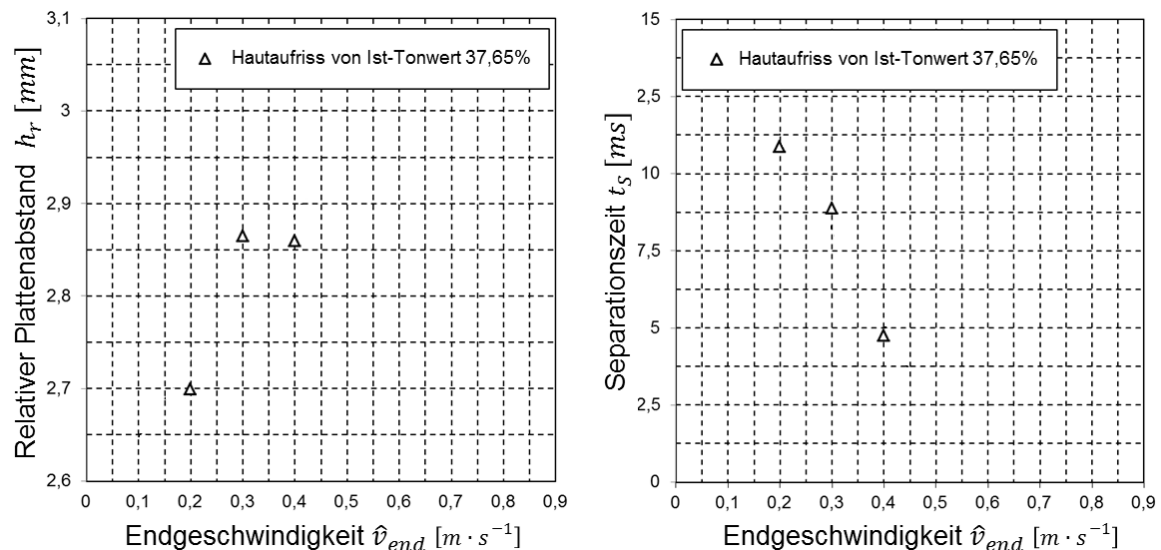


Abbildung 6.16: Hautaufriss bei einem Ist-Tonwert von 37,65 %.

Abbildung 6.16 zeigt, dass von $\hat{v}_{end} = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ein Hautaufriss entsteht. Eine eindeutige Aussage über den Verlauf des Hautaufrisses kann aus den Diagrammen nicht getroffen werden, da nur drei Messwerte vorliegen.

Bei wiederholter Betrachtung von Abbildung 6.15 ist zu erkennen, dass sich neben den diskutierten Filamenten auch feine Filamente im Hinter- und Vordergrund des Stegs

bilden. Diese feinen Filamente werden bei der Methode zur Bestimmung des Hautaufrisses und der Filamentbildung nicht betrachtet. Es gibt bisher keine Möglichkeit deren Auftreten und Verhaltensweisen in der angewandten Methode zu berücksichtigen. In dieser Arbeit werden diese feinen Filamente als sekundäre Filamente definiert. Die folgende Abbildung 6.17 zeigt die Filamentbildung bei einer Endgeschwindigkeiten $\hat{v}_{end} = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ und einem relativen Plattenabstand von $3,4 \text{ mm}$.

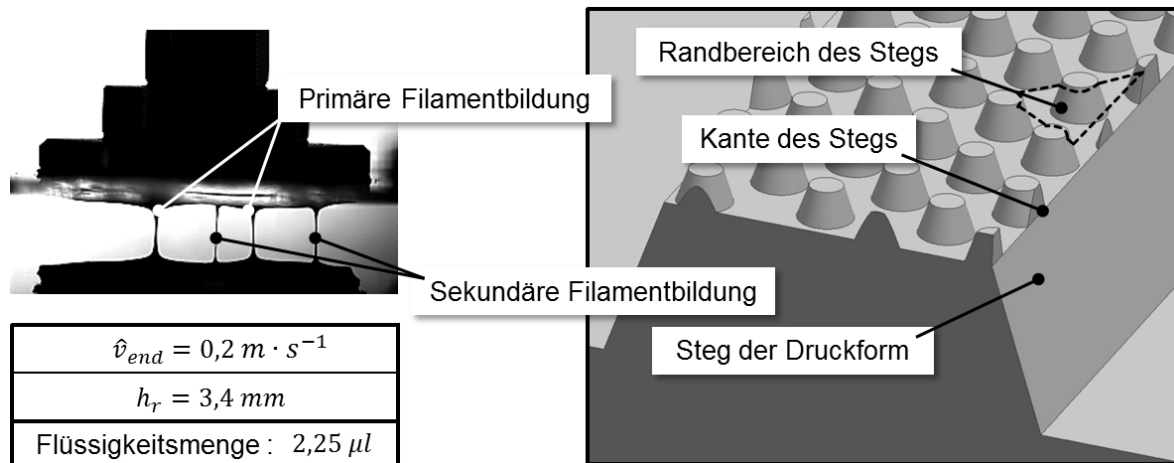


Abbildung 6.17: Darstellung der Filamentbildung bei einem Ist-Tonwert von 37,65 % (links) und schematisch die geometrisch strukturierte Oberfläche des Stegs (rechts).

Die Filamente in Abbildung 6.17 werden in eine primäre und sekundäre Filamentbildung unterteilt. Bei einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bilden sich durch den Hautaufriss zwei Filamente aus. Diese sind hier als primäre Filamente dargestellt. Die sekundären Filamente in Abbildung 6.17 werden durch eine weitere Einflussgröße hervorgerufen. Es wird bei den Experimenten beobachtet, dass sich die sekundären Filamente immer an der gleichen Stelle der Druckform ausbilden. Auch wird eine geringe Versetzung der sekundären Filamente, aus der Fokusebene hin zur Kante des Stegs beobachtet. Bei Betrachtung der geometrischen Strukturierung des Stegs, (s. Abb. 6.17 (links)) zeigt sich, dass in den Randbereichen eine völlig andere Geometrie vorliegt. Es wird daher vermutet, dass die Randbereiche einen Einfluss auf die Druckfarbe ausüben und eine Filamentbildung von Sekundärfilamenten begünstigen. Grund hierfür könnte eine bestimmte Geometrie der Oberfläche des Stegs in Kombination mit der vorliegenden Grenzflächenspannung sein. Diese Randbereiche könnten also auch bei anderen Tonwerten einen Einfluss auf die Filamentbildung ausüben.

Hautaufriss bei einem Ist-Tonwert von 2,23 %:

Die Experimente bei einem Ist-Tonwert von 2,23 % zeigen, dass mit Zunahme der Endgeschwindigkeit der Plattenseparation die zwei sich bildenden Filamente Flüssigkeitsvorhänge aufspannen. Dies wird in den Videoausschnitten der Highspeed-Aufnahmen in Abbildung 6.18 deutlich. Es wird hier die Filamentbildung bei gleichem relativem Plattenabstand und unterschiedlichen Endgeschwindigkeiten \hat{v}_{end} gezeigt.

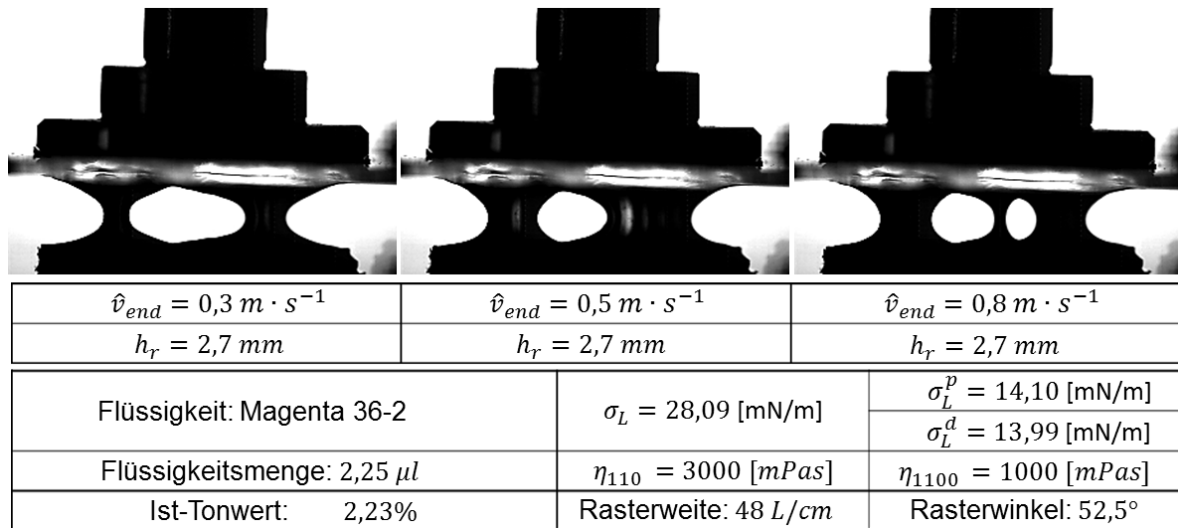


Abbildung 6.18: Videoausschnitte der Filamentbildung bei einem Ist-Tonwert von 2,23 %.

Es bilden sich bis zu einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zwei Filamente aus, wobei sich die Flüssigkeitsvorhänge weiter aufspannen. Ab einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ entsteht in einem der zwei Filamente eine Flüssigkeitshaut. Diese wird instabil und reißt ein, wodurch sich ein drittes Filament bildet. Verdeutlicht wird dieser Zusammenhang bei der Betrachtung des Hautaufrisses über der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation (s. Abb. 6.19).

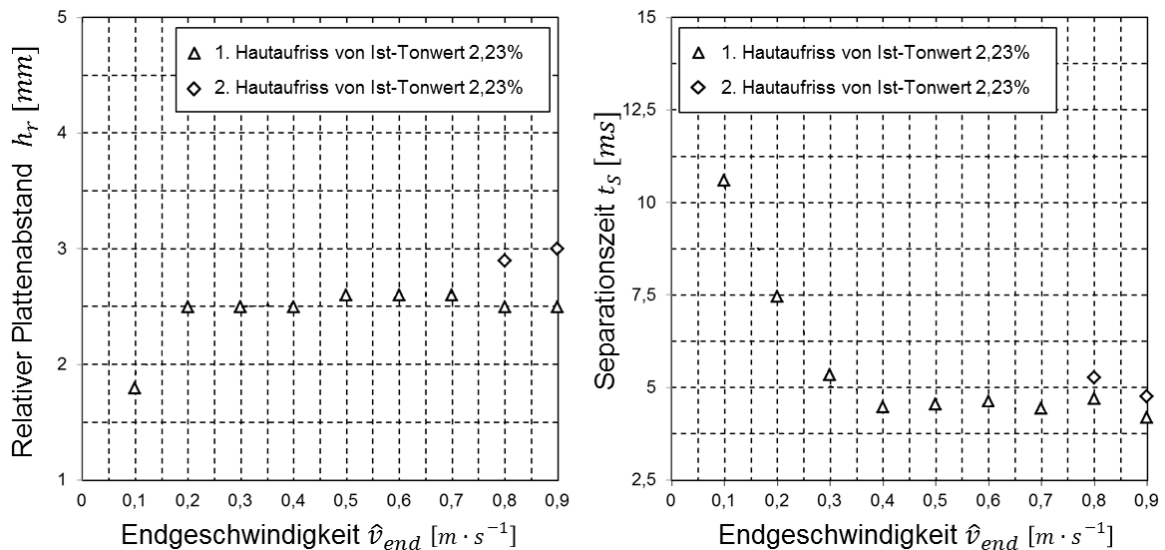


Abbildung 6.19: Hautaufriss bei einem Ist-Tonwert von 2,23 %.

Abbildung 6.19 zeigt den Verlauf des Hautaufrisses über der Endgeschwindigkeit. Hier zeigt sich, dass bis zu einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ die Flüssigkeitshaut nur einmal aufreißt und sich zwei Filamente ausbilden. Es wird bei den Versuchen erkannt, dass der Übergang von zwei zu drei Filamenten bei diskreter Änderung fließend ist. Analog zu den vorherigen Versuchen wird an dieser Stelle angenommen, dass die Oberflächenstrukturierung in Abhängigkeit der vorliegenden Scherviskosität die Art der Filamentbildung beeinflusst.

Betrachtet wird in Abbildung 6.19 der Zeitpunkt des Hautaufrisses über der Endgeschwindigkeit der Platten. Dabei wird eine Annäherung bei ca. 4 ms erkannt. Bei den bisherigen Experimenten zum Hautaufriss konnte aufgrund der Komplexität der Filamentbildung dieser Sachverhalt nicht eindeutig beobachtet werden. Es stellt sich daher die Frage, ob die Beschleunigung des Prüfstands einen Einfluss auf den Hautaufriss hat. Unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsverläufe der Plattenseparation in Abbildung 5.14 wird deutlich, dass die Beschleunigungen der oberen Platte bei den Endgeschwindigkeiten \hat{v}_{end} von $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis $0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ sehr nahe beieinanderliegen. Es wird daher vermutet, dass in einem Bereich des relativen Plattenabstands von 0 bis 1,5 mm bei genannten Endgeschwindigkeiten die gleiche Plattenseparation vorliegt. Eine Änderung der Filamentausbildung entsteht bei diesen Endgeschwindigkeiten erst ab einem relativen Plattenabstand von 1,5 mm. Auch ist nicht bekannt, wie sich die Geschwindigkeitsverläufe auf den späteren Filamentabriss auswirken. Dieser Sachverhalt wird in den folgenden Abschnitten weiter untersucht und diskutiert.

Bei der Auswertung des Hautaufrisses der zweiten Versuchsserie wird grundsätzlich festgestellt, dass eine Oberflächenstrukturierung und die Endgeschwindigkeit der Plattenseparation oder die vorliegende Separationsgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Filamentbildung und somit auf die Farbspaltung haben. Es wird erkannt, dass dieser Einfluss eine Druckfarbe so stark beeinflusst, dass unterschiedliche Phänomene bei der Filamentbildung entstehen. Eine Diskussion der Ergebnisse findet in Kapitel 6.6 statt.

Wie weit sich der Einfluss des Hautaufrisses auf den Filamentabriss und den Druckprozess auswirkt, wird in den folgenden Abschnitten untersucht. Hierzu wird der Filamentabriss der bereits vorgestellten Versuche des Hautaufrisses, bei weiter fortgeschrittener Plattenseparation untersucht.

6.2.2 Bestimmung des Filamentabrisses

Bei der Bestimmung des Filamentabrisses wird untersucht, welchen Einfluss die zuvor stattgefundenene Filamentbildung auf den Augenblick des Abrisses hat. Ziel ist es, den Einfluss der Oberflächenstrukturierung der Druckform und der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation zu untersuchen. Hierzu werden der relative Plattenabstand h_r und die Separationszeit t_s der einzelnen Filamentabrissse bestimmt. Abbildung 6.20 zeigt schematisch den Filamentabriss bei drei Filamenten.

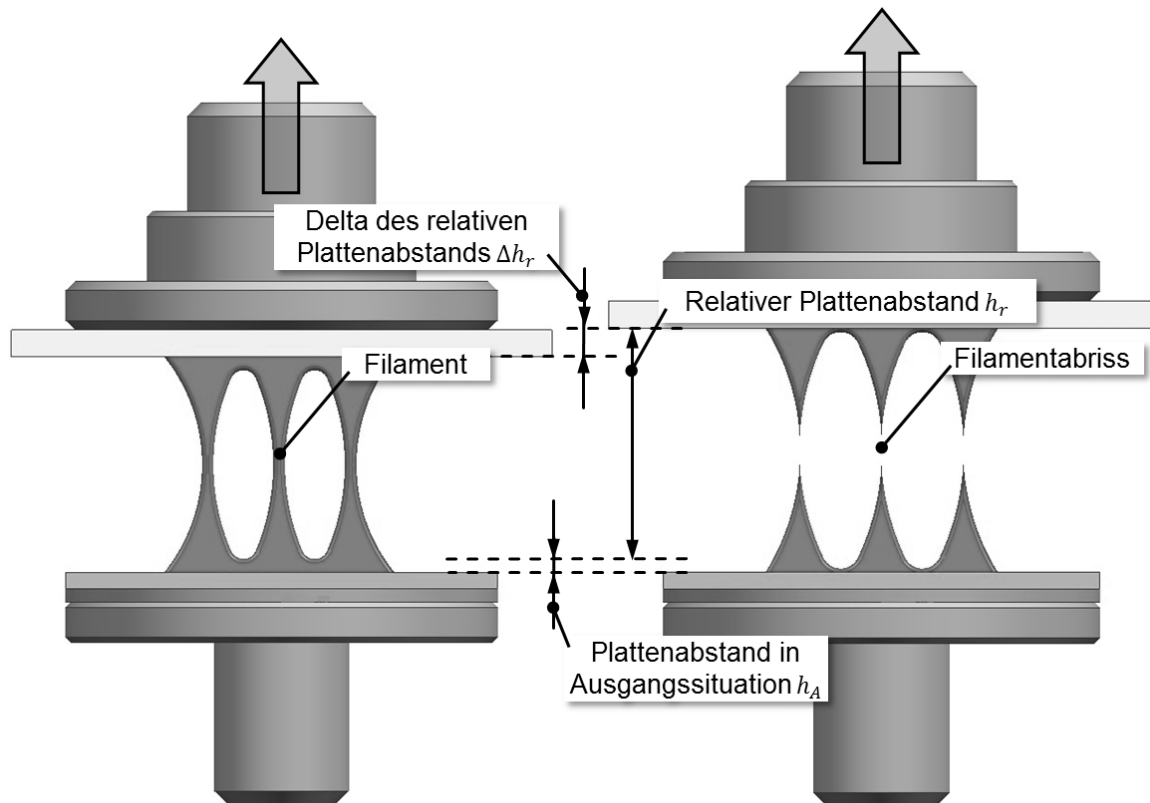


Abbildung 6.20: Schematische Darstellung des Filamentabriss bei drei Filamenten.

Bei einem bestimmten relativen Plattenabstand h_r reißen die Filamente und es findet die eigentliche Farbspaltung statt. Die einzelnen Filamente reißen in Realität nicht gleichzeitig, sondern zeitlich versetzt, da die Filamente bei der Farbspaltung unterschiedliche Flüssigkeitsmenge aufweisen. Die schematische Darstellung von Abbildung 6.20 zeigt den idealen Zustand des Filamentabrisses, bei dem alle drei Filamente gleichzeitig abreißen.

Einen wissenschaftlichen Ansatz dieser Untersuchung zeigen die Arbeiten von BRENN, YARIN, STELLER & DRUST [BRE06], die sich mit der Filamenteinschnürung von Polymerlösungen beschäftigen.

Die folgenden Ergebnisse bei unterschiedlichen Ist-Tonwerten basieren auf den Versuchen der zweiten Versuchsserie und der Filamentbildung aus dem vorherigen Kapitel 6.2.1. Es wird zunächst betrachtet, wie sich der Filamentabriss bei einer Druckform mit einem Ist-Tonwert von 100 % verhält.

Filamentabriss bei einem Ist-Tonwert von 100 %:

Bei einem Ist-Tonwert von 100 %, der als Referenz für die folgenden Versuche verwendet wird, zeigen sich bei der Änderung der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation Unterschiede in Bezug auf den Filamentabriss. Abbildung 6.21 zeigt den Filamentabriss bei einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Wie bereits in Kapitel 6.2.1 gezeigt wird, bildet sich hierbei ein Filament aus, das relativ genau in der Mitte des Stegs der Druckform reißt. Die Flüssigkeitsmenge, die auf der oberen Platte (Glas) und der unteren Platte (Druckform) zurück bleibt, ist nicht bekannt.

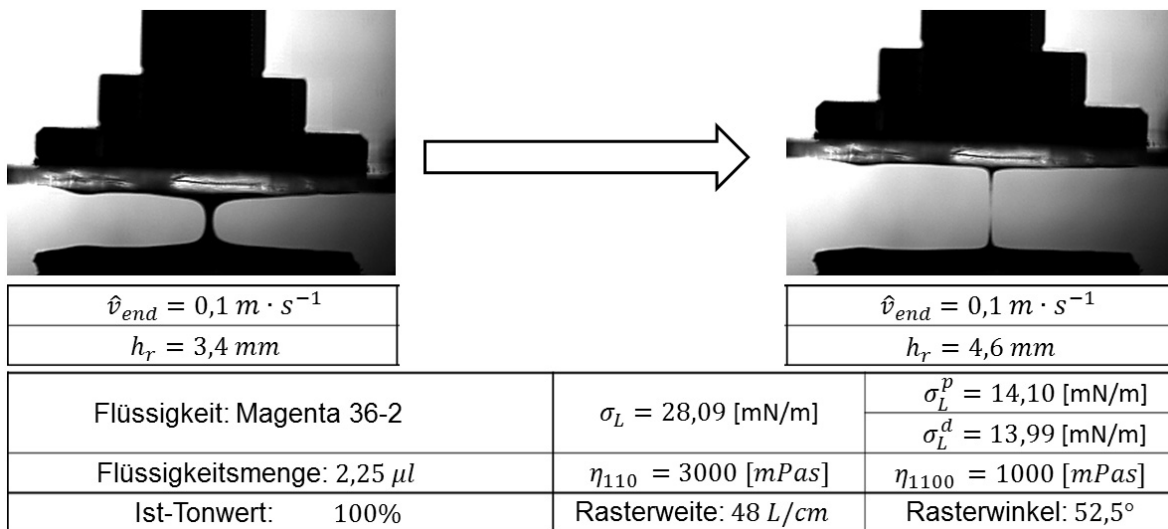


Abbildung 6.21: Videoausschnitte des Filamentabriss bei einem Ist-Tonwert von 100 %.

Das Filament in Abbildung 6.21 schnürt sich symmetrisch ein, bis es bei einem relativen Plattenabstand h_r von $4,6 \text{ mm}$ abreißt. Bei diesem Einschnürvorgang bleibt der Großteil der Druckfarbe auf dem Steg der Druckform und der Glasplatte zurück. Die Farbspaltung hat somit zum Großteil schon stattgefunden, bevor der Filamentabriss erfolgt. Beim eigentlichen Filamentabriss muss im Vergleich zu der gesamten Flüssigkeitsmenge von $2,25 \mu\text{l}$ ein ca. 20-mal kleinerer Teil gespaltet werden. Dabei wird erkannt, dass der Farbübertrag nicht durch den Abrissvorgang der einzelnen Filamente, sondern durch die Filamententstehung stattfindet.

Betrachtet man den Filamentabriss mit Anstieg der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation, so zeigt sich, dass mit Anstieg der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der relative Plattenabstand des Filamentabrisses steigt (s. Abb. 6.22). Es wird angenommen, dass bei höheren Endgeschwindigkeiten der Plattenseparation die Scherviskosität der Druckfarbe Magenta 36-2 abnimmt. Dadurch wird womöglich ein Nachfließen der Flüssigkeit begünstigt, wodurch sich längere Filamente ausbilden. Diese Annahme ergibt sich aus den gemessenen Werten der Scherviskosität über der Schergeschwindigkeit, die in der Tabelle von Abbildung 6.21 aufgeführt sind.

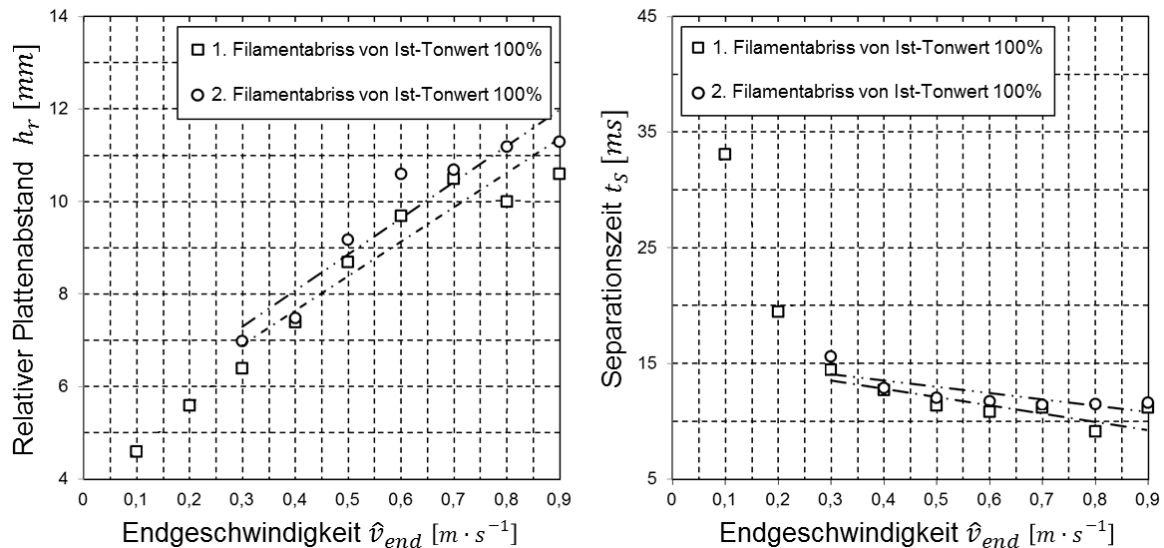


Abbildung 6.22: Filamentabriss bei einem Ist-Tonwert von 100 %.

Die Trendlinien in Abbildung 6.22 zeigen die Entstehung und den Trend beim Filamentabriss von zwei Filamenten ab einer Endgeschwindigkeit von $\hat{v}_{end} 0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Es zeigt sich, dass der zeitliche Filamentabriss mit der Zunahme der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} abnimmt und sich bei einer Separationszeit t_s von ca. 11 ms annähert. Bei weiterer Betrachtung des zeitlichen Abrisses wird ein ähnliches Verhalten wie bei den Ergebnissen des Hautaufrisses in Abbildung 6.19 festgestellt. Es wird daher angenommen, dass die Beschleunigung des Prüfstands im Anfangszustand der Plattenseparation schon einen Einfluss auf den Zeitpunkt des Filamentabrisses ausübt. Ob dieser Sachverhalt richtig ist, wird bei weiteren Darstellungen des Filamentabrisses bei den Ist-Tonwerten 64,58 %, 37,65 % und 2,23 % diskutiert.

Filamentabriss bei einem Ist-Tonwert von 64,58 %:

Bei einem Ist-Tonwert von 64,58 % der Druckform wurde bei der Filamentbildung und der Untersuchung des Hautaufrisses gezeigt, dass sich zwei und drei Filamente ausbilden. In der folgenden Abbildung 6.23 wird der Filamentabriss von zwei Filamenten bei einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dargestellt. Dabei ist bei einem relativen Plattenabstand h_r von $3,4 \text{ mm}$ das rechte Filament stärker ausgeprägt als das Linke. Betrachtet man die Verteilung der Druckfarbe auf dem Steg der Druckform und der Glasoberfläche so erkennt man, dass bei dem ausgeprägteren Filament auf mehr Druckfarbe der Festkörperoberfläche zugegriffen werden kann. Dies setzt eine ungleichmäßige Verteilung der Druckfarbe auf dem Steg voraus.

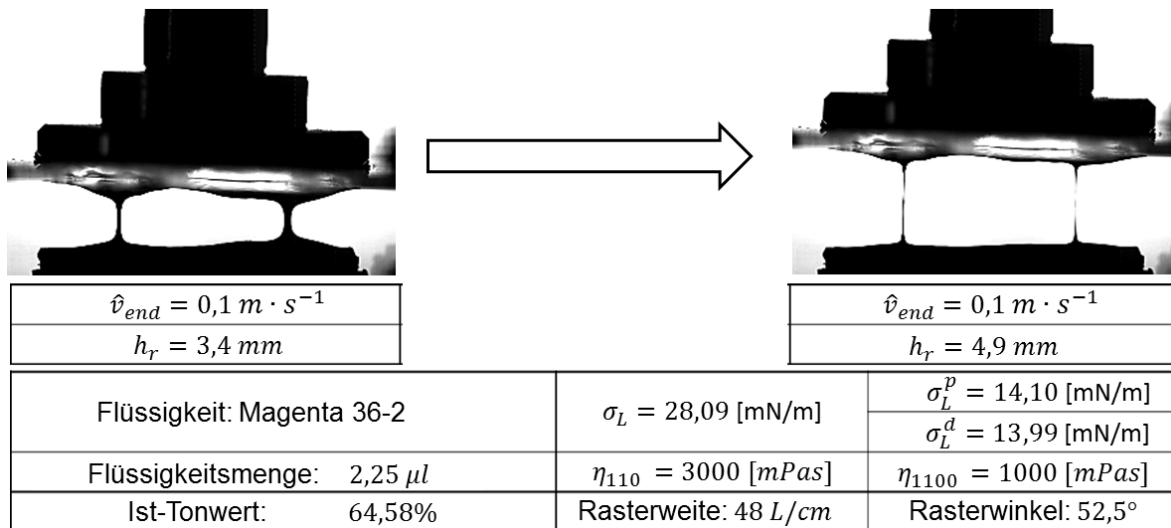


Abbildung 6.23: Videoausschnitte des Filamentabriss bei einem Ist-Tonwert von 64,58 %.

Die Filamente in Abbildung 6.23 reißen fast gleichzeitig, obwohl die Filamentdicke zunächst bei einem relativen Plattenabstand h_r von 3,4 mm unterschiedlich ist. Es wird somit davon ausgegangen, dass es noch weitere Einflussfaktoren auf den Abrisszeitpunkt des Filaments gibt. Dies kann z. B. die vorliegende Scherviskosität sein.

In der folgenden Abbildung 6.24 sind die Filamentabrisse über der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation aufgetragen.

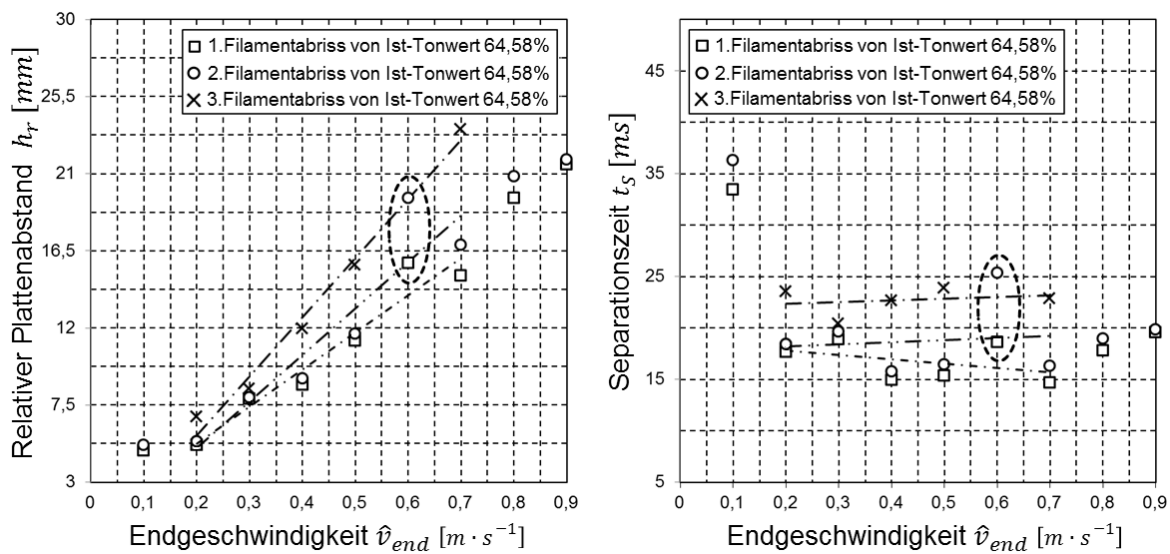


Abbildung 6.24: Filamentabriss bei einem Ist-Tonwert von 64,58 %.

In Abbildung 6.24 werden beim Abriss von drei Filamenten zur Verdeutlichung Ausgleichsgeraden eingezeichnet. Mit deren Hilfe werden der Trend und die Abfolge der Abrisse dargestellt. Betrachtet man den Anstieg des Filamentabrisses grundsätzlich über der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} in Abbildung 6.24, so zeigt sich ein linearer Anstieg des Filamentabrisses. Das gleiche Verhalten ist bei einem Ist-Tonwert von 100 % in Abbildung 6.22 dargestellt. Bei der Betrachtung des zeitlichen Abrisses in Abbildung 6.24 ist zu

sehen, dass mit Zunahme der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} von $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis $0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ das durchschnittliche Abrissverhalten bei einem Wert von ca. 20 ms liegt. Heraus stechen die zwei Messwerte bei einer Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} $0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ die in Abbildung 6.24 umkreist sind. Hier tritt nur der Filamentabriss von zwei Filamenten auf. Hier zeigt sich, dass eins der drei Filamente von einem der übrigen Filamente vor dem Abriss geschluckt wird. Gründe für diesen Sachverhalt werden am Ende dieses Kapitels und in Kapitel 6.6 diskutiert. Es folgen die Ergebnisse bei den Ist-Tonwerten von 37,65 % und 2,23 %.

Filamentabriss bei einem Ist-Tonwert von 37,65 %:

Bei einem Ist-Tonwert von 37,65 % wurde bei der Filamentbildung in Kapitel 6.2.1 festgestellt, dass sich weitere Filamente, sogenannte Sekundärfilamente bilden. Die folgende Abbildung 6.25 veranschaulicht dieses Verhalten bei einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

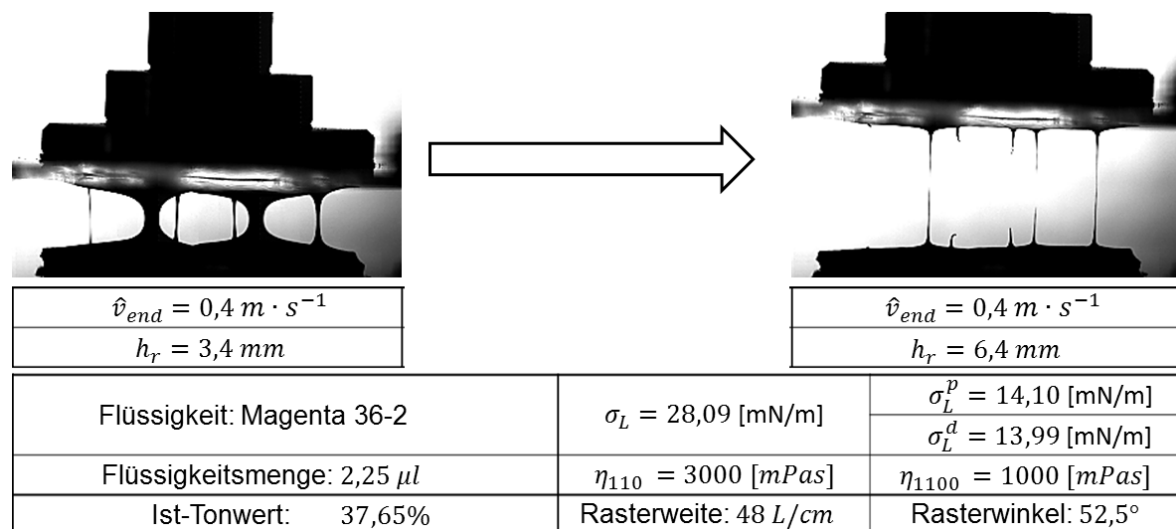


Abbildung 6.25: Videoausschnitte des Filamentabriss bei einem Ist-Tonwert von 37,65 %.

In Abbildung 6.25 wird ebenfalls deutlich, dass der Filamentabriss nicht in Abhängigkeit der Filamentdicke steht, was die Behauptung, die bei einem Ist-Tonwert von 64,58 % aufgestellt wurde, untermauert. Während die zwei Primärfilamente in Abbildung 6.25 reißen, bleibt eines der Sekundärfilamente (ganz rechts) noch erhalten. Es wird vermutet, dass die Druckfarbe, die sich am Rand des Steps der Druckform durch die Randeffekte ansammelt, bei der Separation der Platten eine geringere Scherung als bei den einschnürenden Filamenten erfährt. Dadurch liegt in diesem Bereich des Steps bei der Druckfarbe eine niedrigere Scherviskosität als in den Primärfilamenten vor. Eine niedrige Scherviskosität begünstigt die Bildung von längeren Filamenten. Dies würde erklären, warum das Sekundärfilament (ganz rechts) als Letztes abreißt. Der Unterschied zu den anderen Sekundärfilamenten kann damit erklärt werden, dass bei dem Sekundärfilament (ganz rechts) stationär ein größeres Flüssigkeitsvolumen vorliegt.

Eine niedrige Scherviskosität kann dazu führen, dass eine Flüssigkeit über eine Oberfläche besser nachfließt. Somit kann bei einer Vorhangbildung mehr Druckfarbe über den Steg der Druckform nachfließen, woraus ebenfalls lange Filamente resultieren können. Grundsätzlich wird ein Filament durch eine niedrige Scherviskosität anfälliger gegen Schubspannungen und kann einfacher zerreißen. Hier wird vermutet, dass es ein Idealverhältnis von Scherviskosität und Filamentdicke geben muss, um eine maximale Filamentdehnung zu erreichen. Dies wird allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Abbildung 6.26 zeigt den Filamentabriss über der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} . In der Darstellung sind nur die Abrisse der Primärfilamente dargestellt. Die Sekundärfilamente werden hier nicht berücksichtigt. Es zeigt sich bei den Primärfilamenten ein linearer Anstieg des Filamentabriss über der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} .

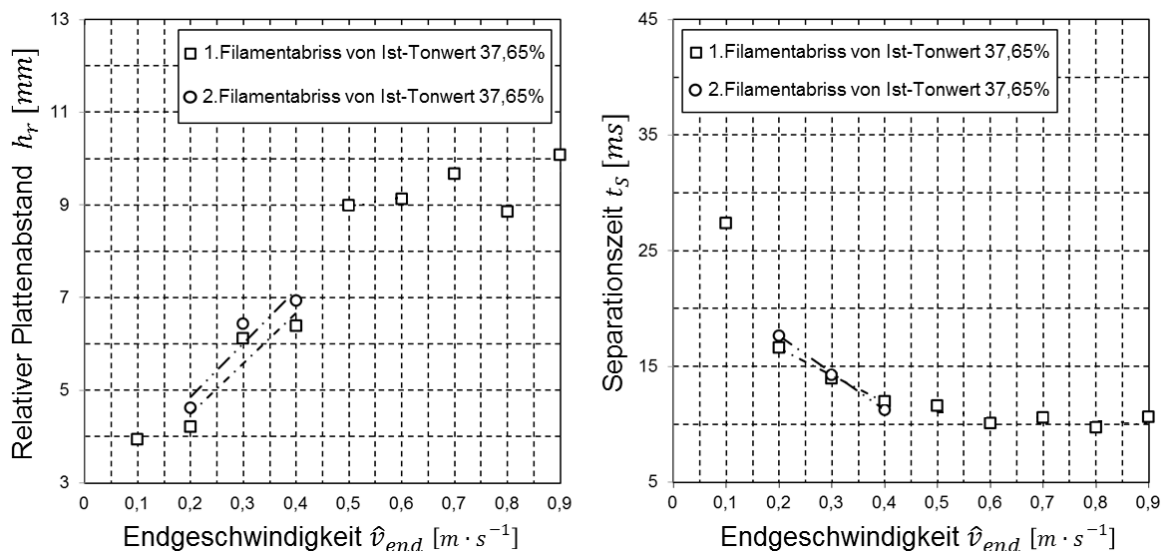


Abbildung 6.26: Filamentabriss bei einem Ist-Tonwert von 37,65 %.

In Abbildung 6.26 wird bezüglich des linearen und des zeitlichen Abrisses ein ähnliches Verhalten wie bei den zuvor diskutierten Ist-Tonwerten von 100 und 64,58 % erkannt. Die Zeit bis zum Abriss der Filamente nähert sich hier mit Zunahme der Endgeschwindigkeit einem Wert von ca. 10 ms. Es folgen die Ergebnisse bei den Ist-Tonwerten von 2,23 %.

Filamentabriss bei einem Ist-Tonwert von 2,23 %:

Bei einem Ist-Tonwert von 2,23 % der Druckform bilden sich, wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, bei einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,1$ bis $0,2 m \cdot s^{-1}$ zwei Filamente aus. Die folgende Abbildung zeigt den Filamentabriss bei drei Filamenten, der ab einer Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,8 m \cdot s^{-1}$ entsteht. Deutlich zu erkennen sind zwei sehr ausgeprägte Filamente und ein weniger ausgeprägtes Filament (s. Abb. 6.27).

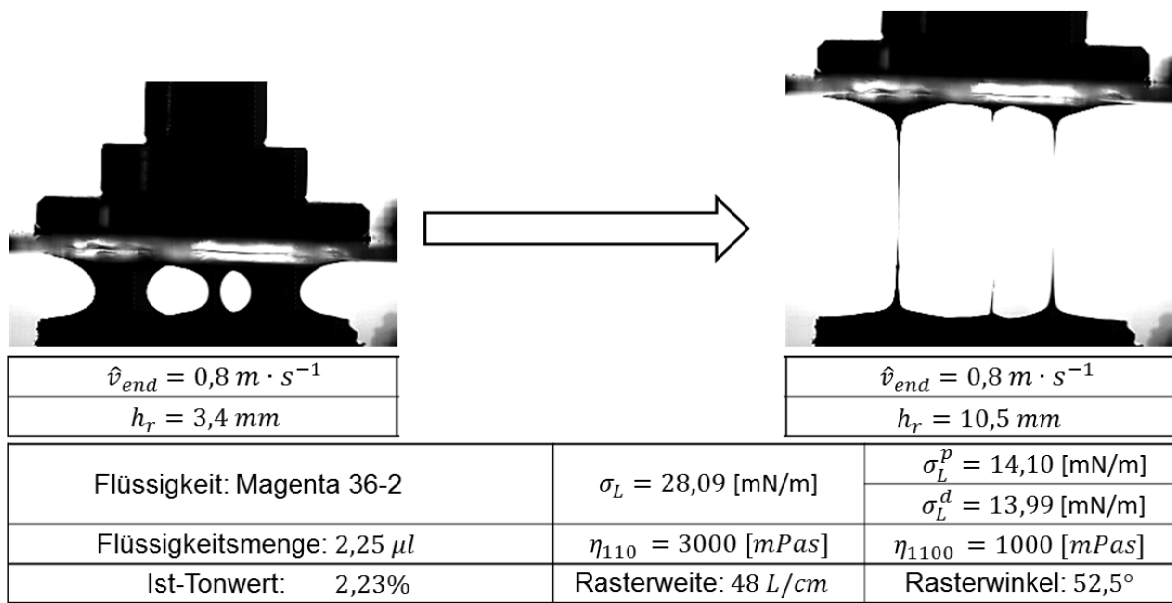


Abbildung 6.27: Videoausschnitte des Filamentabriss bei einem Ist-Tonwert von 2,23 %.

Abbildung 6.27 zeigt die Plattenseparation und den Abriss der drei Filamente. Dabei liegt in den einzelnen Filamenten nicht die gleiche Flüssigkeitsmenge vor. Hier wird erkennbar, dass ein Filament mit einem weniger ausgeprägten Filament eine geringere Flüssigkeitsmenge aufweist und deshalb früher abreißt.

Abbildung 6.28 zeigt den Filamentabriss über der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} .

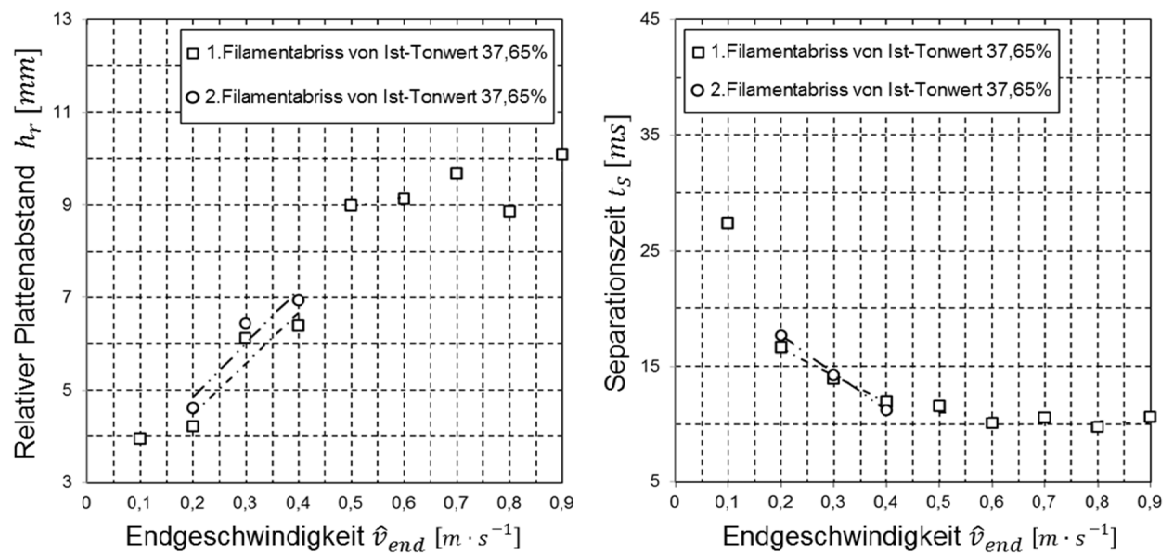


Abbildung 6.28: Filamentabriss bei einem Ist-Tonwert von 2,23 %.

Bei Betrachtung des Filamentabrisses bei einem bestimmten relativen Plattenabstand h_r über der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} zeigt sich ein lineares Verhalten, wie bei den bisher untersuchten Tonwerten. Was den zeitlichen Verlauf des Filamentabriss betrifft, zeigt sich hier wie bei den anderen Tonwerten eine Annäherung bei einem bestimmten Wert. Dieser Annäherungswert liegt bei ca. 15 ms. Die Trendlinien verdeutlichen den Filamentabriss der zwei Filamente.

Es wird bei den Untersuchungen des Filamentabrisses festgestellt, dass die zuvor stattfindende Filamentbildung einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbildung der einzelnen Filamente hat. Dies bezieht sich in erster Linie auf die Anzahl der sich ausbildeten Filamente und in zweiter Betrachtung auf die vorliegende Scherviskosität in den Filamenten. Die Charakteristik des linearen Verhaltens des Abrisses bei einem relativen Plattenabstand h_r über der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} ist bei allen untersuchten Ist-Tonwerten ähnlich.

Alle untersuchten Tonwerte zeigen beim zeitlichen Abriss über der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} immer eine Annäherung bei einem bestimmten Wert. Bei Betrachtung der ersten drei Geschwindigkeitsverläufe der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} von $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in Abbildung 5.14 zeigt sich, dass deren Beschleunigungsverläufe bei einem relativen Plattenabstand h_r von $1,0 \text{ mm}$ relativ weit auseinander laufen. Es wird angenommen, dass der zeitliche Abriss t_s bei diesen Endgeschwindigkeiten aus den Beschleunigungsunterschieden resultiert.

Da die Geschwindigkeitsverläufe bei den Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} von $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis $0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis zu einem relativen Plattenabstand von $1,0 \text{ mm}$ sehr nahe beieinander liegen wird festgestellt, dass hier fast die gleichen Beschleunigungen vorliegen (s. Abb. 5.14). Bei dem zeitlichen Abriss zeigt sich bei diesen Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} ein ähnlicher Wert beim Filamentabriss. Es wird daher vermutet, dass die Druckfarbe im Anfangszustand der Plattenseparation vorgeprägt wird. Es wird weiter angenommen, dass die Druckfarbe soweit vorgeprägt wird, dass der Zeitpunkt des Filamentabrisses beeinflusst wird. Dies schließt nicht aus, dass im Anfangszustand der Plattenseparation die Oberflächenstrukturierung einen Einfluss auf die Prägung hat. Es stellt sich die Frage, ob ein Prüfstand mit konstanter Beschleunigung für die Untersuchung der Farbspaltung besser geeignet ist. Daraus resultiert die Erkenntnis, dass die Prägung im Anfangszustand der Plattenseparation einen Einfluss auf die Filamentausbildung und den Filamentabriss hat.

In den folgenden Abschnitten wird auf die Ergebnisse der dritten Versuchsserie eingegangen. Hierbei werden gezielt auf die Ausrichtung der Druckform, den Einfluss der Rasterweise und die Variation der Druckfarbe und deren Phänomene bei der Farbspaltung eingegangen.

6.3 Einfluss der Ausrichtung des Rasters

In dem vorliegenden Kapitel wird untersucht, welchen Einfluss die Ausrichtung des Rasters bzw. der Rasterwinkel der Druckform (s. Abb. 5.16) auf die Filamentbildung und die Farbspaltung hat. Die Versuche, die hierzu herangezogen werden, sind in der dritten Versuchsserie entstanden. Es wird festgestellt, dass im Anfangszustand der Plattenseparation die Filamentbildung und die Entstehung der Filamente maßgeblich durch die Geschwindigkeitsprofile beeinflusst werden. Hierzu werden gezielt Phänomene im Anfangszustand der Plattenseparation untersucht und miteinander verglichen. In Kapitel 6.2.1 wird beobachtet, dass zwischen den Ist-Tonwerten von 37,65 % und 64,58 % der Druckform, die Filamentbildung sich phänomenologisch ändert. Deshalb wird in der dritten Versuchsserie der Ist-Tonwert von 45,85 % untersucht (s. Tab. 4.1). Die Rasterwinkel, die miteinander verglichen werden, sind 0° und $52,5^\circ$. Abbildung 6.29 zeigt die unterschiedliche Filamentbildung mit Anstieg der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation bei den genannten Rasterwinkeln 0° und $52,5^\circ$.

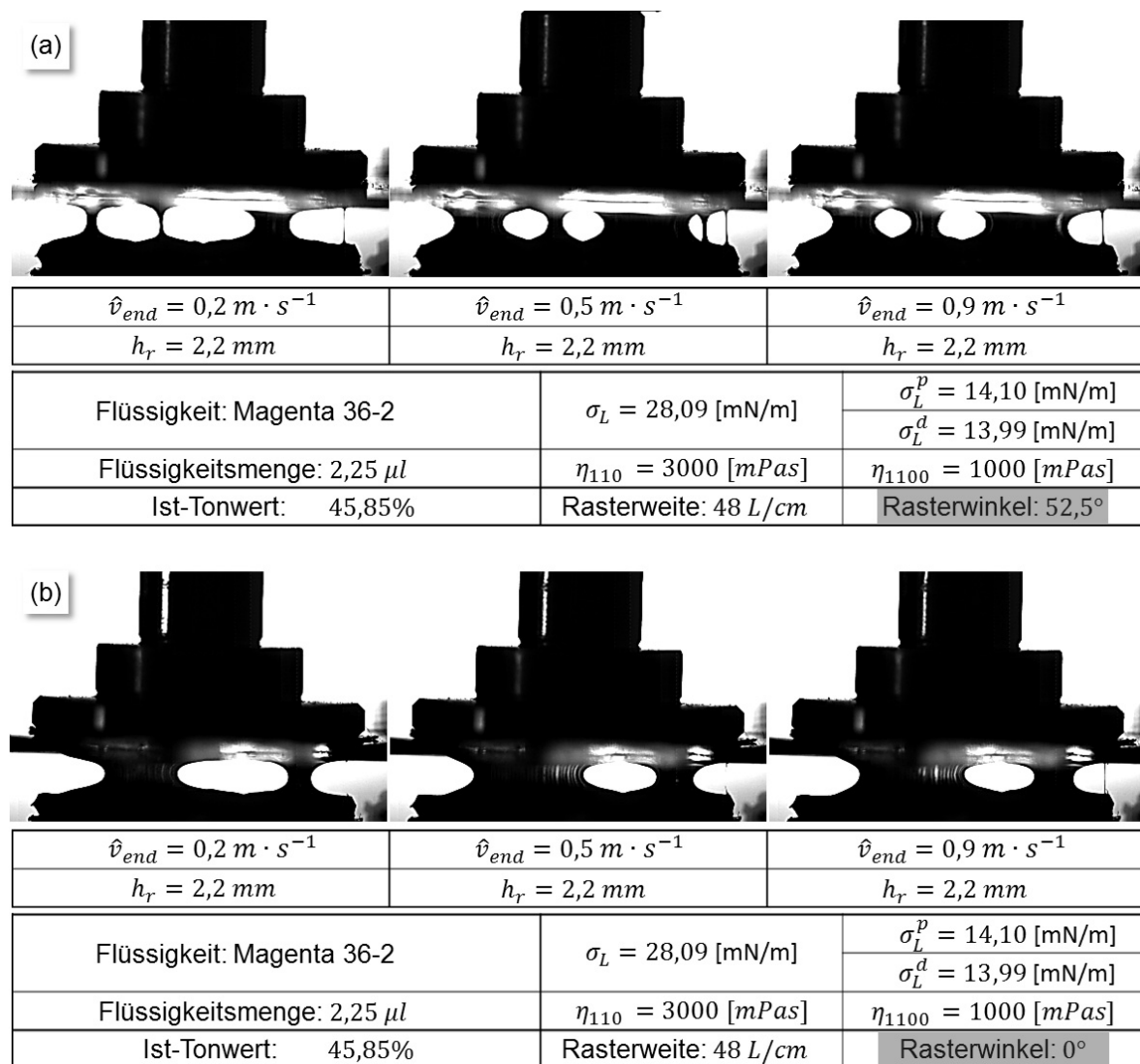


Abbildung 6.29: Videoausschnitte der Filamentbildung bei einem Rasterwinkel von $52,5^\circ$ (a) und 0° (b).

Weitere Versuchsgrößen werden in den Tabellen unter den Videoausschnitten in Abbildung 6.29 aufgeführt. Abbildung 6.29 (a) zeigt die Filamentbildung bei einem Rasterwinkel von $52,5^\circ$. Es wird weiter beobachtet, dass bei einem Ist-Tonwert von 48,85 % drei Primärfilamente, aber auch Sekundärfilamente entstehen. Es wird interpretiert, dass hier eine Zwischenform aus den Untersuchungen mit einem Ist-Tonwert von 37,65 % und 64,58 % vorliegt. Zum Vergleich betrachte man Abbildung 6.13 und Abbildung 6.15 aus der zweiten Versuchsserie.

Abbildung 6.29 (b) zeigt das gleiche Experiment mit einem Rasterwinkel auf 0° . Es ist zu sehen, dass sich bei unterschiedlichen Endgeschwindigkeiten \hat{v}_{end} und gleicher Farbmenge immer zwei Filamente ausbilden, die sich zu Flüssigkeitsvorhängen aufspannen. Auch tritt verstärkt die Entwicklung von Lamellen auf. Es zeigt sich somit bei einem Rasterwinkel von 0° ein grundsätzlich anderes Verhalten in Bezug auf die Entstehung der Filamente als bei $52,5^\circ$.

Die Versuche der Kontaktwinkelmessung in Kapitel 4.3.2 zeigen, dass im statischen Fall der Rasterwinkel keinen signifikanten Einfluss auf die Farbe Magenta 36-2 hat. Die Oberfläche der Druckform kann bei einer darüber strömenden Druckfarbe einen richtungsabhängigen Einfluss z. B. die Änderung des Kontaktwinkels hervorrufen. Auch kann aus der Sicht der Strömungsmechanik aufgrund der Ausrichtung der Oberflächenstrukturierung auf einen geringeren Reibungswiderstand geschlossen werden (s. Abb. 5.16). Die Lage der Rasterpunkte ist parallel zur Stegrichtung. Es wird daher vermutet, dass ein Rasterwinkel von 0° der Oberflächenstrukturierung der Druckform das Nachfließen der Druckfarbe begünstigt. Dies kann eine Verringerung der Filamententstehung zur Folge haben.

6.4 Einfluss der Rasterweite

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sich die Rasterweite der Druckform auf die Filamentbildung auswirkt. Die Untersuchung ist ein Teil der dritten Versuchsserie (s. Tab. 5.7). Hierzu wird die Rasterweite der Druckform zwischen 48 und 60 Linien/cm variiert. In einem weiteren Schritt wird verglichen, wie sich der Rasterwinkel bei der Variation der Rasterweite verhält. Durch die Änderung der Rasterweite ergibt sich der Ist-Tonwert zu 44,63 %.

Rasterweiten von 48 und 60 Linien/cm (Rasterwinkel $52,5^\circ$):

Abbildung 6.30 zeigt die Filamentbildung bei 48 und 60 Linien/cm der Druckfarbe Magenta 36-2 bei unterschiedlichen Endgeschwindigkeiten \hat{v}_{end} und einem Rasterwinkel von $52,5^\circ$.

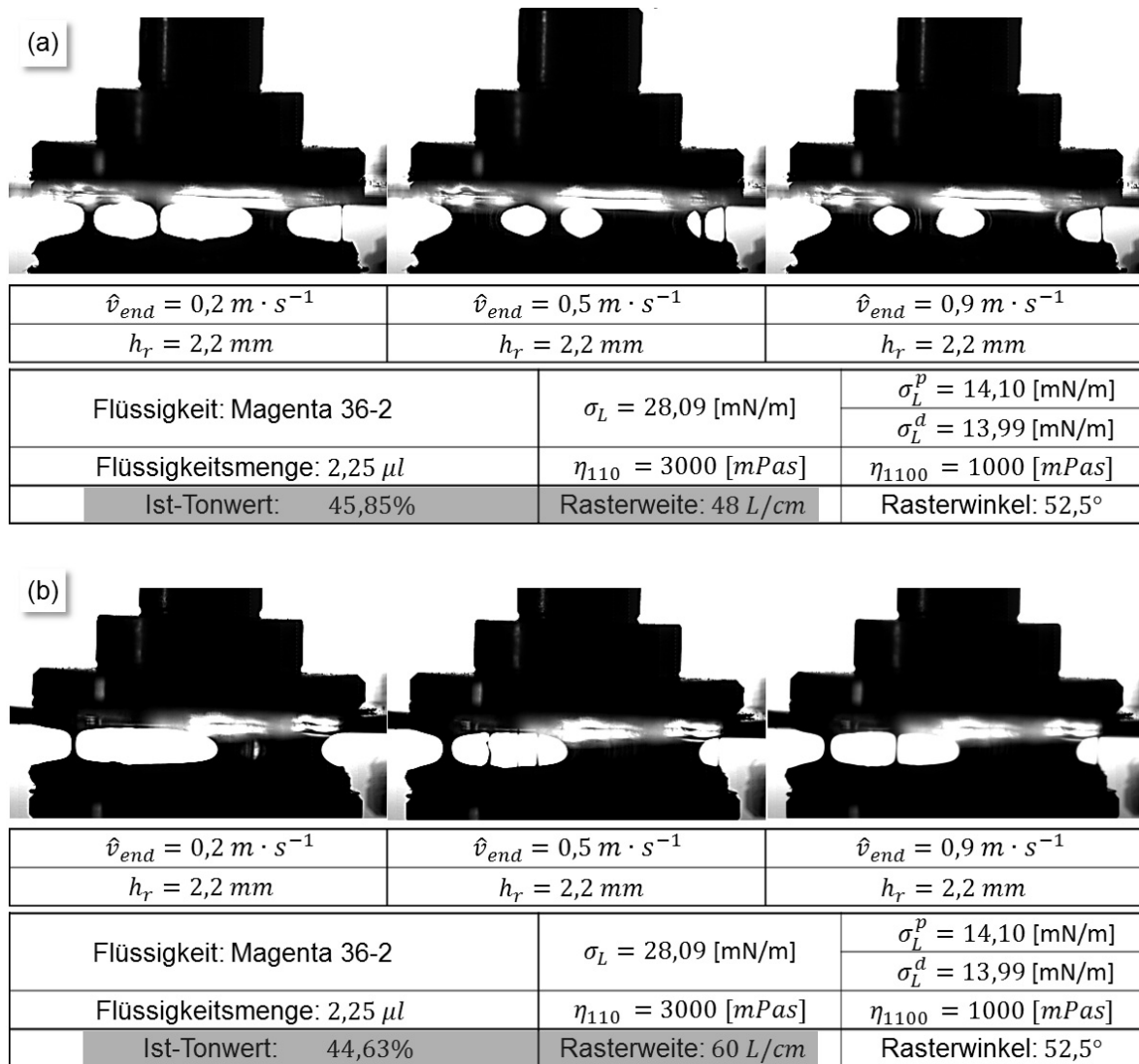


Abbildung 6.30: Videoausschnitte der Filamentbildung bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm (a) und 60 Linien/cm (b) und einem Rasterwinkel von $52,5^\circ$.

Abbildung 6.30 zeigt Videoausschnitte der Highspeed-Aufnahmen bei den Rasterweiten 48 und 60 Linien/cm. Im direkten Vergleich der Videoausschnitte zeigt sich eine Änderung der Filamentausbildung. Es wird erkannt, dass die Verringerung der Rasterweite auf 60 Linien/cm die Oberflächenstrukturierung der Druckform so stark verändert, dass sich die Filamentausbildung anders darstellt. Es wird daher interpretiert, dass sich durch die Änderung der Oberflächenstrukturierung das Benetzungsverhalten der Druckfarbe ändert. Dadurch hat die Oberflächenspannung der Druckfarbe einen größeren Einfluss auf die Filamententstehung. Warum sich in Abbildung 6.30 bei 60 Linien/cm nur auf der rechten Seite ein Flüssigkeitsvorhang aufspannt, ist nicht klar. Es wird vermutet, dass die Druckfarbe versucht, die Oberflächenspannung an ihrer Oberfläche zu reduzieren und sich in diesem Fall auf der rechten Seite des Steps ausbildet.

Es folgt die gleiche Untersuchung bei einem Rasterwinkel von 0° und der Variation von Rasterweite von 48 und 60 Linien/cm.

Rasterweite bei 48 und 60 Linien/cm (Rasterwinkel 0°):

In einem weiteren Schritt wird der gleiche Versuch mit einer Drehung des Rasterwinkels auf 0° wie unter Kapitel 6.2 vorgenommen. Die Rasterweite wird ebenfalls variiert. Alle weiteren Versuchsparameter bleiben gleich. Abbildung 6.31 zeigt die dabei entstehenden Videoausschnitte der Filamentbildung.

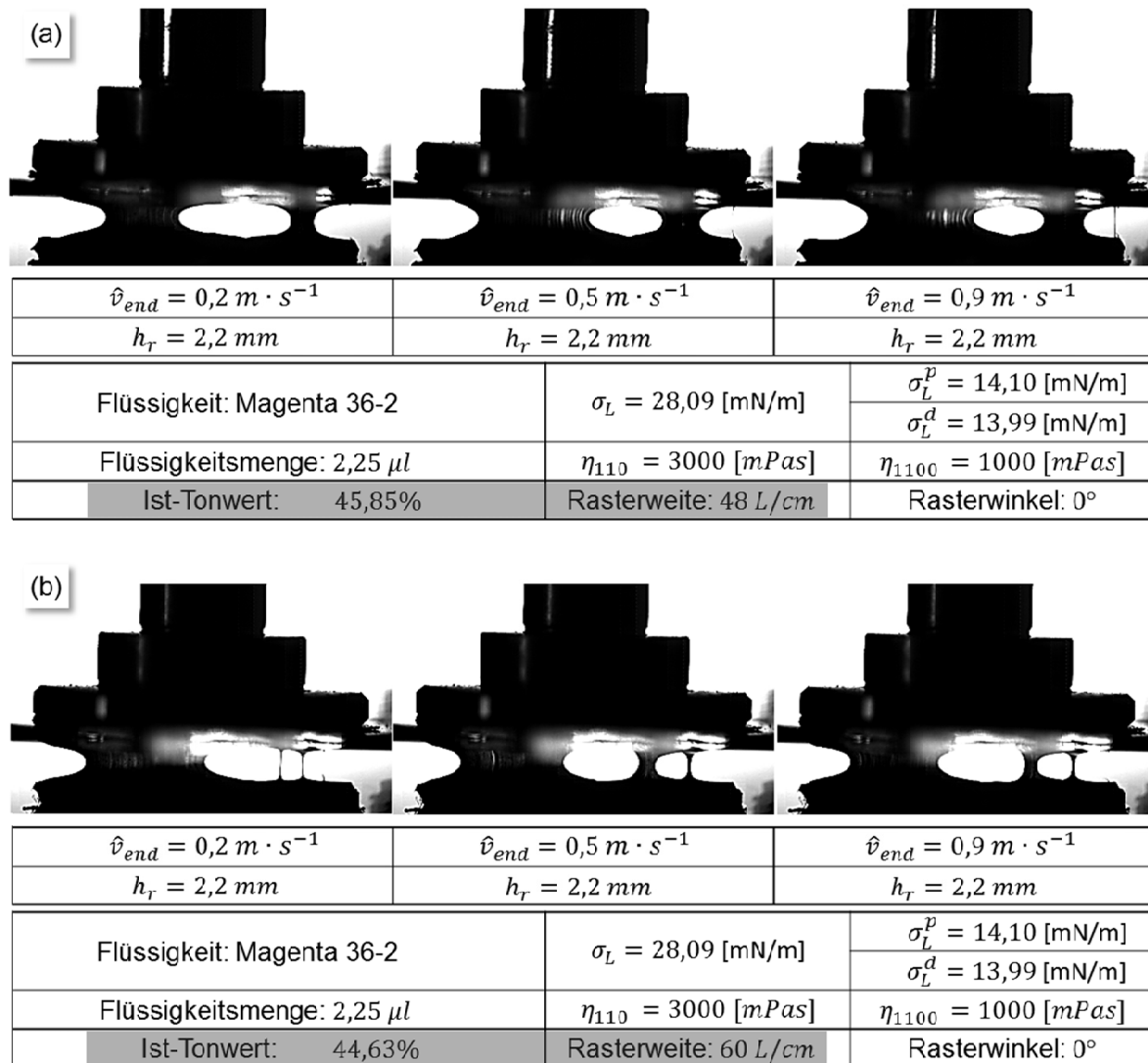


Abbildung 6.31: Videoausschnitte der Filamentbildung bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm (a) und 60 Linien/cm (b) und einem Rasterwinkel von 0°.

In Abbildung 6.31 zeigt sich bei beiden Rasterweiten ein Trend eines Primärfilaments auf der linken Seite des Stegs. Dabei sind die gleichen grundsätzlichen Phänomene der Filamentbildung zu erkennen. Es wird daher interpretiert, dass die Ausrichtung des Rasters dies bewirkt und einen größeren Einfluss auf die Filamentbildung hat als die Rasterweite. Betrachtet man die Videoausschnitte in Abbildung 6.31 (a) und 6.31 (b), so wird deutlich, dass bei Abbildung 6.31 (b) mehr Sekundärfilamente entstehen. Es wird erkannt, dass die Änderung der Rasterweite einen Einfluss auf die Filamentbildung hat. Es kann aber nicht verifiziert werden, welche Einflussgrößen überwiegen. In Abbildung 6.31 überwiegt der

Einfluss des Rasterwinkels. Die Rasterweite hat anschließend Einfluss auf die Sekundärfilamente. Dieser Zusammenhang kann sich bei unterschiedlichen Druckfarben anders darstellen. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass Rasterwinkel und Rasterweite einen Einfluss auf die Filamentbildung haben. Auffällig dabei ist der Trend des Primärfilaments nach rechts oder links, je nach gewähltem Rasterwinkel von 0° oder $52,5^\circ$. Es wird daher vermutet, dass noch weitere Größen einen Einfluss auf die Filamentbildung haben.

Im folgenden Abschnitt wird untersucht, wie sich unterschiedliche Druckfarben bei der Farbspaltung verhalten.

6.5 Einfluss der Druckfarbe auf die Filamentbildung

In diesem Abschnitt wird untersucht, welchen Einfluss die Eigenschaften der Druckfarbe auf die Filamentbildung haben. Hierzu wird die Druckfarbe Magenta 36-2, die bei den bisherigen Untersuchungen verwendet wurde, mit der Druckfarbe Magenta 39-6 bei den Experimenten der Farbspaltung verglichen (s. Abb. 6.32).

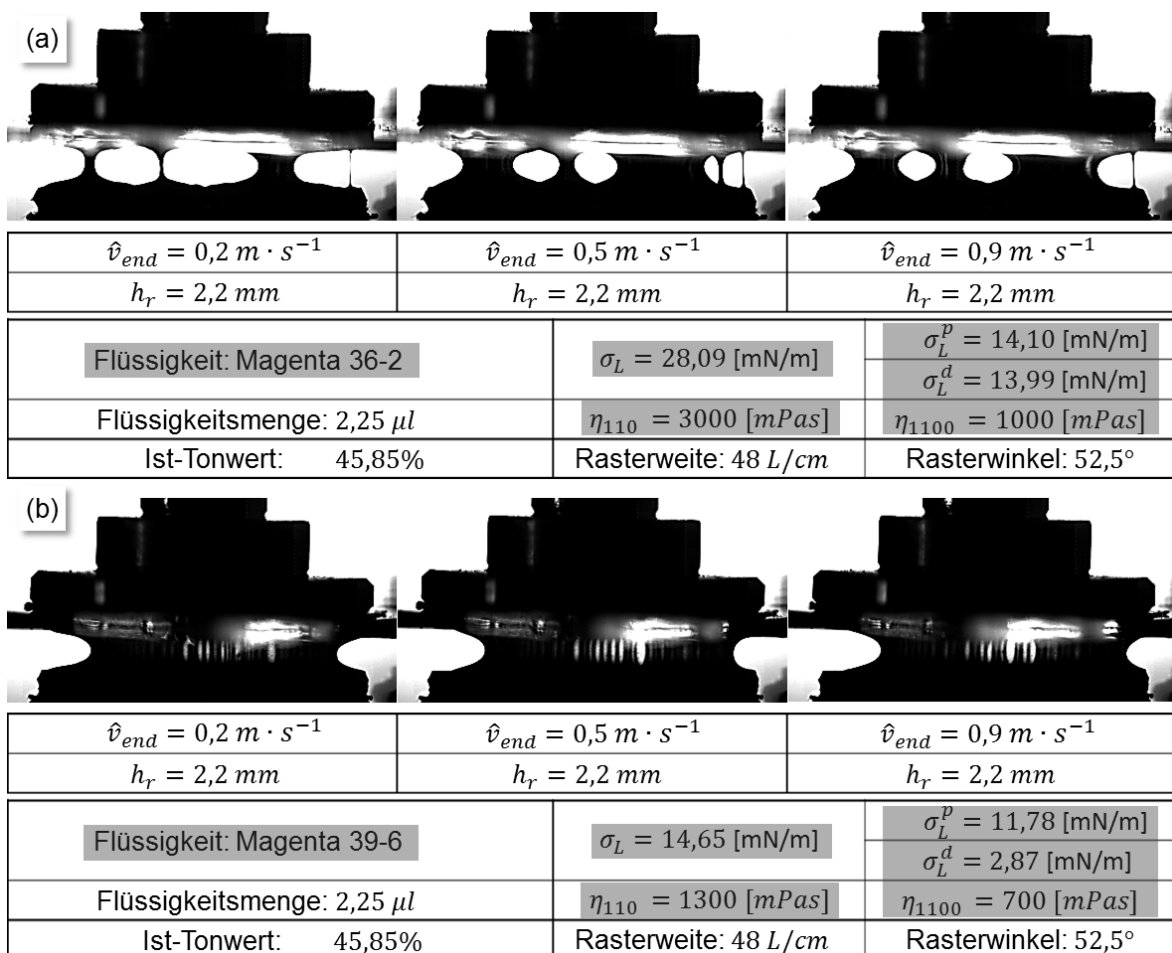


Abbildung 6.32: Videoausschnitte der Filamentbildung bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm und Rasterwinkel von $52,5^\circ$ mit Magenta 36-2 (a) und Magenta 39-6 (b).

Abbildung 6.32 zeigt die Filamentbildung der zwei Druckfarben bei einem Rasterwinkel von $52,5^\circ$ und einer Rasterweite von 48 Linien/cm. Mit Anstieg der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} zeigt sich bei den drei Videoausschnitten in Abbildung 6.32 (b) keine visualisierbare Änderung der Filamentbildung. Unter der Betrachtung der Abfolge von Phänomenen in Kapitel 6.1.2 wird deutlich, dass es sich bei Magenta 39-6 um einen Flüssigkeitsvorhang mit Lamellen handelt. Es wird vermutet, dass eine niedrigere Oberflächenspannung von Magenta 39-6 im Vergleich zu Magenta 36-2 zu der Bildung des Flüssigkeitsvorhangs und der Lamellen führt. Bei fortschreitender Plattenseparation, die hier jedoch nicht dargestellt ist, bilden sich bei Magenta 39-6 bis zu einer Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} von $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ein Filament und ab $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zwei Filamente aus. Vergleicht man die beiden Abbildungen 6.32 (a) und 6.32 (b) so wird deutlich, dass eine Druckfarbe mit unterschiedlichen Scherviskositäten und Oberflächenspannungen grundsätzlich ein anderes Verhalten bei der Filamentausbildung und somit bei der Farbspaltung aufzeigt.

Im folgenden Abschnitt werden die Erkenntnisse, die bei den Experimenten zur vorliegenden Arbeit entstanden, zusammengefasst und diskutiert.

6.6 Erkenntnisse der Experimente

Mit den Experimenten dieser Arbeit wird eine Vielzahl an neue Erkenntnisse zur Farbspaltung im Flexodruck gewonnen. Die Erkenntnisse sollen dazu genutzt werden, den Druckprozess im Flexodruck, speziell unter der Anwendung von strukturierten Linien zu verstehen und für die Druckbarkeit von Funktionalität anwendbar zu machen. Hierzu müssen die Entstehung von Phänomenen bei der Farbspaltung und deren Einflussgrößen verstanden werden. Die im Folgenden aufgeführten Aspekte stellen eine Übersicht der in dieser Arbeit gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse dar.

Durch eine Vielzahl an Versuchen (ca. 2200) wird ein breites Portfolio an Phänomenen der Farbspaltung bei der Anwendung eines Linienkontakts beobachtet. Daraus können grundsätzliche Phänomene der Flüssigkeitsspaltung schematisch klassifiziert und dargestellt werden. Auch wird die grundsätzliche Abfolge der Phänomene analysiert und in einem Abfolgediagramm dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass sich bei der Farbspaltung Filamente ausbilden und wie diese im Einzelnen entstehen. Es wird erkannt, dass vor der eigentlichen Filamentbildung bei Druckfarben sich zunächst ein Flüssigkeitsvorhang ausbildet, der mit fortschreitender Plattenseparation einschnürt oder aufreißt. Dabei entstehen ein oder mehrere Filamente. Dieses Verhalten wurde in der Wissenschaft auf strukturierten Druckformen so noch nie untersucht. Durch die Komplexität der Strömungsform ist es schwierig, Literatur zum Vergleich heranzuziehen.

Die Filamentbildung wird anhand einer Parameterstudie näher untersucht. Dabei werden die Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation und der Ist-Tonwert der Druckform verändert. Es wird deutlich, dass die Oberflächenstrukturierung der Druckform einen

primären Einfluss auf die Filamentbildung hat. Mit Zunahme der Endgeschwindigkeit verändert sich die Filamentausbildung. In Abhängigkeit der Separationsgeschwindigkeit wird festgestellt, dass unterschiedliche Scherviskositäten in der Druckfarbe vorliegen, die die Filamentbildung beeinflussen. Somit besteht ein Zusammenhang zwischen der Separationsgeschwindigkeit bei vorliegender Scherviskosität der Druckfarbe und der Ausbildung von Filamenten. Diese Erkenntnis kann dazu genutzt werden funktionale Druckfarben bezüglich ihrer Scherviskosität über der Schergeschwindigkeit zu verändern und für den Flexodruck zu optimieren.

Auch wird bei den Experimenten festgestellt, dass sich bei einer bestimmten Oberflächenstrukturierung der Druckform durch Randeffekte des Stegs Sekundärfilamente bilden. Gerade beim funktionalen Drucken besteht ein Hauptaugenmerk darin, sehr scharfe Konturen der gedruckten Schicht auf der Substratoberfläche zu erzielen. Die Bildung von Filamenten im Randbereich führt gegebenenfalls hierbei zu einem negativen Ergebnis. Durch eine gezielte Änderung des Randbereichs der Druckformoberfläche könnte die Bildung von Filamenten im Randbereich verhindert werden.

In einem weiteren Schritt wird der Filamentabriss untersucht. Beim Filamentabriss wird festgestellt, dass Primär- und Sekundärfäden ein unterschiedliches Abreißverhalten zeigen. Bei Primärfilamenten findet im Vergleich zu Sekundärfilamenten eine Einschnürung über die Länge des Stegs der Druckform statt. Es wird festgestellt, dass mit Zunahme der Endgeschwindigkeit \hat{v}_{end} der Plattenseparation die Primärfilamente länger werden, bis sie abreißen. Grund hierfür kann ebenfalls die vorliegende Scherviskosität sein, die bei höherer Schergeschwindigkeit abnimmt. Durch eine niedrigere Scherviskosität wird das Nachfließen über den Steg begünstigt. Dadurch liegt stationär mehr Druckfarbe vor, wodurch sich längere Filamente ausbilden, bis diese schließlich abreißen. Bei Sekundärfilamenten findet keine Strömung über den Steg der Druckform statt, dadurch wird festgestellt, dass hier eine geringere Scherung und dadurch eine relativ hohe Scherviskosität vorliegt. Eine höhere Scherviskosität führt ebenfalls zu einer längeren Dehnung der Filamente. Es konnte wiederholt bei allen Arten von Filamenten beobachtet werden, dass die Filamentdicke kein Indiz für deren Abrisszeitpunkt ist.

Bei den Untersuchungen des Filamentabrisses wird auch festgestellt, dass das Geschwindigkeitsprofil des Dehnrheometers bei der Plattenseparation einen Einfluss auf den Filamentabriss hat. Aufgrund der Geschwindigkeitsverläufe konnte verifiziert werden, dass im Anfangszustand der Plattenseparation die Druckfarbe vorgeprägt wird. Diese hat einen solch starken Einfluss, dass der Zeitpunkt des Filamentabrisses vorherbestimmt ist. Für eine nachfolgende Untersuchung der Farbspaltung wäre es daher ratsam, konstante Beschleunigungen bei der Plattenseparation zu untersuchen.

In einer weiteren Parameterstudie wird gezielt untersucht, wie sich der Rasterwinkel der Druckform auf die Filamentbildung auswirkt. Dabei wird festgestellt, dass sich beispielsweise bei einem Rasterwinkel von $52,5^\circ$ drei Filamente und bei einem

Rasterwinkel von 0° zwei Filamente ausbilden. Die sonstigen Parameter des Versuchs werden nicht verändert. Es wird erkannt, dass durch eine Längsausrichtung der Druckpunkte ein Nachfließen der Druckfarbe über den Steg begünstigt und die Filamentausbildung beeinflusst wird. In einem weiteren Experiment wird die Rasterweite der Druckform verändert. In diesem Fall zeigt sich bei der Filamentbildung, dass sich der Flüssigkeitsvorhang bei einer Rasterweite von 60 Linien/cm je nach Rasterwinkel rechts oder links auf dem Steg bildet. Es wird erkannt, dass die Oberflächenstrukturierung der Druckform weniger Einfluss auf die Druckfarbe hat. Die Oberfläche der Druckfarbe versucht ihre Oberflächenspannung energetisch zu reduzieren und bildet das Filament rechts oder links auf dem Steg aus. Es liegt die Vermutung nahe, dass hier eventuell eine weniger starke Benetzung der Druckform vorliegt, als bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm. Dies erklärt, warum die Oberflächenspannung der Druckfarbe auf die Filamentbildung einen stärkeren Einfluss ausübt als die Oberfläche der Druckform. Im Anschluss daran folgt die Untersuchung von unterschiedlichen Druckfarben. Dabei zeigt sich, dass eine Druckfarbe mit Abnahme ihrer Scherviskosität und Oberflächenspannung stärker dazu neigt, einen Flüssigkeitsvorhang mit Lamellen auszubilden. Es wird darüber hinaus beobachtet, dass dieses Verhalten nicht zwangsläufig einen Einfluss auf die Filamentbildung hat.

Die vorgestellten und diskutierten Ergebnisse dieser Arbeit geben einen Einblick in die Komplexität der Farbspaltung von Linienkontakten im Flexodruck. Die gewonnenen Ergebnisse können dazu verwendet werden, den Druckprozess für das Drucken von Funktionalität zu verbessern. Die Methode der parallelen Plattenseparation dieser Arbeit kann dazu verwendet werden, in Vorversuchen die Farbspaltungsphänomene zu erkennen und deren Einfluss auf die Qualität von Druck-Erzeugnissen in der Druckmaschine zu validieren. Gleichmaßen können so unterschiedlichste Oberflächen und Flüssigkeiten charakterisiert werden. Eine ausführliche Darstellung der Videoausschnitte der Highspeed-Aufnahmen aller Versuche bzw. Versuchsserien finden sich im Anhang dieser Arbeit.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit untersucht wissenschaftlich den Druckprozess bzw. die Farbspaltung im Flexodruck unter Anwendung einer strukturierten Linie der Druckform. Dabei ist das vorrangige Ziel, den Flexodruck für die Herstellung von gedruckter Funktionalität wie z. B. gedruckte Dehnungsmesselemente (DMS) nutzbar zu machen. Hierzu wird die Farbspaltung mithilfe eines experimentellen Versuchsaufbaus unter Einsatz eines Dehnrheometers und der parallelen Plattenseparation simuliert. Dabei werden erstmals mit einer Highspeed-Kamera Phänomene der Farbspaltung zwischen der Flexodruckform und einer Glasplatte untersucht.

Um Einflussgrößen der Farbspaltung im Vorfeld der Experimente zu identifizieren, werden die verwendeten Flüssigkeiten, deren Benetzungsverhalten und die Oberfläche der Druckform charakterisiert. Bei den Experimenten der Farbspaltung wird im Rahmen einer Parameterstudie erkannt, dass unterschiedlichste Phänomene bei der Filamentbildung in Abhängigkeit der Oberflächenstrukturierung der Druckform, der vorliegenden Flüssigkeit und der Separationsgeschwindigkeit entstehen. Hierbei werden erstmals grundsätzliche Phänomene der Filamentbildung im Flexodruck und deren Abfolge festgestellt und dokumentiert. Zu ihnen gehört die Bildung von Flüssigkeitshäuten und Lamellen. Diese reißen auf und bilden Filamente aus. Es wird erkannt, dass in Abhängigkeit der genannten Parameter eine unterschiedliche Anzahl von Filamenten entsteht. Diese werden bei fortschreitendem Plattenabstand der Glasoberfläche zur Druckform immer länger, bis sie schließlich abreißen. Die Separationsgeschwindigkeit der Platten beeinflusst dabei die vorliegende Scherviskosität der Druckfarbe und dadurch den Filamentabriss.

Die Entstehung der Filamente hat einen wesentlichen Einfluss auf die Farbübertragung und das Druckergebnis. Der experimentelle Versuchsaufbau und die dabei gewonnenen Erkenntnisse können dazu verwendet werden, die Herstellung gedruckter Funktionalität zu ermöglichen. Durch eine gezielte Anpassung der Oberflächenstrukturierung der Flexodruckform kann die Verdruckbarkeit unterschiedlichster Flüssigkeiten unter Anwendung der parallelen Plattenseparation optimiert werden. Gleichmaßen wird durch die Ergebnisse dieser Arbeit das Grundlagenwissen der Farbspaltung im Flexodruck für die Herstellung von gedruckter Funktionalität erweitert. Dabei stellt diese Arbeit ein Bindeglied zwischen der wissenschaftlichen Theorie und der praktischen Anwendung im Flexodruck dar.

Die Validierung der Experimente und deren Versuchsparameter im Druckprozess einer industriellen Druckmaschine stehen noch aus und können in einer folgenden Arbeit untersucht werden.

Die Versuche dieser Arbeit waren durch die vorgegebenen Parameter des Dehnrheometers begrenzt. Deshalb wird empfohlen die Methode der parallelen Plattenseparation bei einer

Neukonzeption des Versuchsaufbaus weiterzuverfolgen und dahin gehend zu optimieren, dass die Filamentbildung auch bei konstanten Beschleunigungen untersucht werden kann.

Im Rahmen einer weiteren Untersuchung können mit der Methode der parallelen Plattenseparation unterschiedlichste Materialien der Druckform und des Substrats untersucht werden.

Die Aufstellung eines mathematischen Modells des Filamentabrisses wurde in Rahmen dieser Arbeit nicht vorgestellt. Hierzu gibt es Ansätze, die im Rahmen einer nachfolgenden Veröffentlichung vorgestellt werden.

Des Weiteren können die durchgeführten Experimente und das gewonnene Videomaterial zur Filamentbildung als Rohdaten für Simulationsprogramme der Fluidmechanik wie z. B. OpenFoam verwendet werden.

8. Literaturverzeichnis

- [AMA05] M. Ben Amar, M. B. & Bonn, D. (2005). *Fingering instabilities in adhesive failure*. Physica D - Nonlinear Phenomena, 209, 1.
- [AND05] Andrianos Chemicals (2005). *EG-Sicherheitsdatenblatt Glycerin (99,5 %)*. Verfügbar unter: <http://www.andrianos.com/glycerine-tech-msds.pdf> [November, 2012].
- [ANN00] Anna, S.L. (2000). *Filament Stretching of Model Elastic Liquids*. Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University: Cambridge.
- [ANN01] Anna, S. L., McKinley, G. H., Nguyen, D. A., Sridhar, T., Muller, S. J., Huang, J. & James, D. F. (2001). *An Interlaboratory Comparison of Filament Stretching Rheometers*. Journal Rheology, 45(1), S. 83-114.
- [APE11] Apfel, J. (2011). *Daten und Phänomene*. Frankfurt, M. [i. e. Heusenstamm]: Ontos-Verlag.
- [ARN10] Arnolds, O., Buggisch, D., Sachsenheimer, D. & Willenbacher, N. (2010). *Capillary breakup extensional rheometry (CaBER) on semi-dilute and concentrated polyethyleneoxide (PEO) solutions*. Rheologie Acta 49, 11, 1207.
- [ARN11] Arnolds, O. (2011). *Dehnrheologie verdünnter, halbkonzentrierter und konzentrierter Polymerlösungen untersucht mit Capillary Breakup Extensional Rheometry (CaBER)*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- [BAC03] Bach, A., Rasmussen, H. K. & Hassager, O. (2003). *Extensional viscosity for polymer melts measured in the filament stretching rheometer*. Journal Rheol., 47(2), S. 429-441.
- [BAR10] Barral, Q., Ovarlez, G., Chateau, X., Boujlel, J., Rabideau, B. & Coussot, P. (2010). *Adhesion of yield stress fluids*. Verfügbar unter: <http://www.rsc.org/en/content/articlepdf/2010/sm/b922162j> [September, 2012].
- [BAT67] Batchelor, G. K. (1967). *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge University Press.
- [BAT68] Bataille, J. (1968). *Stabilité d'un Déplacement Radial Non Miscible*. Revue de L'Institut Français du Pétrol, 23, S. 1349-1364.

- [BEH93] Behler, H. (1993). *Die Randstruktur von Druckpunkten – eine experimentelle Untersuchung der Farbspaltungsströmung*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.
- [BER99] Berg, M. (1999). *Untersuchungen zur Erzeugung und Dosierung dünner Flüssigkeitsschichten auf Walzen*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz.
- [BER06] Bergmann, L. & Schaefer, K. (2006). *Gase Nanosysteme Flüssigkeiten – Lehrbuch der Experimentalphysik* (2. Auflage). Berlin: Gruyter Verlag.
- [BER07] Bertran, F. L., Pursals, R. A. & Artigues, C. C. (2007). *Dual Technology optical Profilimeter*. Patent Application Publications, Pub. No.: US 2007/0165241 A1.
- [BIC01] Bico, J., Tordeux, C. & Quéré (2001). *Rough wetting*. Erophysics letters, 55 (2), S. 214-220.
- [BIR87_a] Bird, R.B., Armstrong, R.C. & Hassager, O. (1987). *Dynamics of Polymeric Liquids*. Journal Fluid Mechanics, 2 ed., Vol. I: Fluid Mechanics, New York: Wiley.
- [BIR87_b] Bird, R.B., Armstrong, R.C. & Hassager, O. (1987). *Dynamics of Polymeric Liquids*. Journal Fluid Mechanics, 2 ed., Vol. II: Kinetic Theory, New York: Wiley.
- [BLE75] Blevin, W.R. & Steiner, B. (1975). *Redefinition of the Candela and the Lumen*. Metrologia, 11, S. 97-104.
- [BOH02] Bohl, W. (2002). *Technische Strömungslehre* (12. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Würzburg: Vogel Verlag.
- [BOR10] Bornemann, N. (2010). *Topographie–Seminar I: Sensofas Basics & Bedienung*. Schulungsunterlagen, Technische Universität Darmstadt.
- [BOR12] Bornemann, N., Guck, T. Bitsch, T. & Dörsam, E. (2012). *Characterization of Gravure Cells using Confocal Mikroskopy*. Iarigai, Advances in Printing and Media Technology, Vol. XXXIX, S. 221-226.
- [BOS72] Bosse, R. (1972). *Beiträge zur meßtechnischen und statischen Erfassung von Farbschwankungen im Offsetdruck*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.

- [BOU04] Bould, D. C., Claypole, T. C. & Boham, M. F. J. (2004). *An investigation into plate deformation in flexographic printing*. Proceeding of Institute of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, S. 1499-1511.
- [BRA96] Brain, A. A., Chivers, R. A. & Grandville, N. W. (1996). *The Influence of Adhesive Fibrillation on the Peeling of Pressure Sensitive Adhesive Coated Tapes*. The European Adhesion Conference '96 [EURADH '96].
- [BRE03] Brethour, J. M. (2003). *Filling and Emptying of Gravure Cells – A CFD Analysis*. Converttech Pacific October 2002, Vol. 10, No 4, S. 34-37.
- [BRE06] Brenn, G., Yarin, A.L., Steller, M. & Durst, F. (2006). *Capillary thinning of filaments of polymer solutions with surfactants*. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 282–283, S. 68–74.
- [BRI50] Briggs, L. J. (1950). *Limiting negative pressure of water*. Journal Appl. Phys., 21, S. 721.
- [BRÖ97] Brötz, H. (1997). *Ein Beitrag zur Farbübertragung in Naßoffsetfarbwerken unter besonderer Berücksichtigung des Feuchtmittels*. Institutsbericht des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Hochschule Darmstadt.
- [BÜR11] Bürkle GmbH (2011). *Viskosität von Flüssigkeiten*. Verfügbar unter: http://www.buerkle.de/media/files/Downloads/Viskositaeten_DE.pdf [November, 2012].
- [CAS44] Cassie, A. B. D. & Baxter, S. (1944). *Wettability of porous surfaces*. Transactions of the Faraday Society, 40, S. 546.
- [CAS94] Castillo, M. E. G. (1994). *Modelling and Parallel Simulation of Three-Dimensional Ribbing Instability in Symmetric Forwards-Roll Coating Process*. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology.
- [CHH10] Chhabra, R. P. (2010). *Non-Newtonian Fluids: An Introduction*. Verfügbar unter: <http://www.physics.iitm.ac.in/~compflu/Lect-notes/chhabra.pdf> [Juli, 2012].
- [CHI00] Chiche, A., Pareige, P. & Creton, C. (2000). *Role of surface roughness in controlling adhesion of a soft adhesive on a hard surface*. C.R. Acad. Sci. Paris: Polymers at Interfaces, 1(9), S. 1-8.

- [CHU10] Chu, K.-H., Xiao, R. & Wang, E. N. (2010). *Uni-directional liquid spreading on asymmetric nanostructured surfaces*. Nature Materials, Vol. 9, S. 413-417.
- [CIA06] Ciaston, M. & Pibiri, E. (2006). *Oberflächenspannung*. Hausarbeit zur physikalischen Grenzflächenchemie, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- [CON12] Conrad (2012). *Basetech Digitale Mikroskopkamera USB 1.3 Mio. Pixel*. Verfügbar unter: <http://www.conrad.biz/ce/de/product/191312/Basetech-Digitale-Mikroskopkamera-USB-13-Mio-Pixel-Vergroesserungsfaktor-25-und-60-x> [November, 2012].
- [CUL60] Culick, F. E. C. (1960). *Comments on a ruptured soap film*. J. Appl. Phys. 31, S. 1128–1129.
- [CUN74] Cuny, K. H. (1974). *Chemie* (11. Auflage). Hannover: Hermann Schroedel Verlag.
- [DAL11] Dallmann, S. (2011). *Reinigung superhydrophober Oberflächen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund.
- [DEU99] Deutschsprachige Flexodruck-Fachgruppe e.V. [DFTA] & Meyer, K.-H. (1999). *Technik des Flexodrucks* (4. neu bearbeitete Auflage). St. Gallen: Coating-Fachbücher.
- [DEU07] Deutschsprachige Flexodruck-Fachgruppe e.V. [DFTA] (2007). *Grundlagen des Flexodrucks*. Unterlagen zum Fachseminar am DFTA-Technologiezentrum September 2007.
- [DEV04] Devisetti, S. K. (2004). *Pressure Distribution and Transfer in Rolling Nips*. Master Thesis, University of Maine.
- [DIR01] Dirking, T., Boogs, L. & Willenbacher, N. (2001). *Elongational Flow Behavior of Automotive Coatings and its Relation to Atomization and Mottling*. Progress in Organic Coating, 42, S. 59-64.
- [DÖR02] Dörfler, H.-D. (2002). *Grenzflächen und kolloid-disperse Systeme*. Berlin: Springer Verlag.
- [DÖR12] Dörsam, E. (2012). *Printing Technology for Electronics*. Vorlesungsskript, Technische Universität Darmstadt.

- [DUS74] Dussan, E. B. & Davis, S. H. (1974). *On the motion of a fluid-fluid interface along a solid surface*. Journal of Fluid Mechanics. Vol. 65, Part 1, S. 71-95.
- [EDM12] Edmund Optics (2012). *Additive/subtraktive dichroitische Farbfilter*. Verfügbar unter: <http://www.edmundoptics.de/optics/optical-filters/color-dichroic-filters/additive-subtractive-dichroic-color-filters/1734?dc&PageNum=1#products> [November, 2012].
- [EIS00] Eisinger, H. (2000). *Der Flexodruck*. Verfügbar unter: <http://www.kunstunterricht.de/referate/flexo.pdf> [Januar, 2012].
- [ERA12] Eral, H. B., Manneftje, D. J. C. M., Oh, J. M. (2012). *Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications*. Verfügbar unter: http://www.utwente.nl/tnw/pcf/publications/pcf_2005/PDF%20Author%20versions/Dieter.pdf [Februar 2012].
- [ESC01] Eschl, J. (2001). *Die mechanischen Eigenschaften von Stereolithographiematerialien während der Aushärtung*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [EXT02] Extrand, C. W. (2002). *Model for Contact Angles and Hysteresis on Rough and Ultraphobic Surfaces*. Langmuir, Vol. 18, No. 21, S. 7991-7999.
- [FER01] Fernando, R. H., Xing, L. L. & Glass, J. E. (2001). *Rheology Parameters Controlling Spray Atomization and Roll Misting Behavior of Waterborne Coatings*. Progress in Organic Coatings, 42, S. 284-288.
- [FLI12] Flint Group (2012). *Nyloflex – Technical Data*. Verfügbar unter: http://www.flintgrp.com/en/documents/Printing-Plates/nyloflex/nyloflex_techn_data_DE.pdf [November, 2012].
- [FOR77] Forschungsgesellschaft Druck [FOGRA] (1977). *Zusammenhang zwischen Viskosität und Zügigkeit von Druckfarben: Theoretische Analyse und Laboruntersuchungen an einer Offsetmaschine*. Forschungsbericht, Nr. 5.009.
- [FOR98] Forschungsgesellschaft Druck [FOGRA] (1998). *Einfluss der Farbspaltung auf die Homogenität der Farbschichtdickenverteilung im Offsetdruck unter besonderer Berücksichtigung des Drucks mit frequenzmodulierten Rastern*. Forschungsbericht, Nr. 52 023, S. 10-17.
- [GAO09] Gao, L., McCarthy, J. & Zhang, X. (2009). *Wetting and Superhydrophobicity*. Langmuir, 25 (24), S. 14100-14104.

- [GEL11] Grellmann, W., Seidler, S. (2011): *Kunststoffprüfung* (2. Auflage). München: Carl Hanser Verlag.
- [GLÜ79] Glück, M. (1979). *Untersuchungen über das Verhalten von Druckfarbe im Spalt zweier Farbwerkswalzen*. Institutsbericht des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Hochschule Darmstadt.
- [GRI99] Grillet, A. M., Lee, A. G. & Shaqfeh, E. S. G. (1999). *Observations of ribbing instabilities in elastic fluid flow with gravity stabilization*. Journal Fluid Mech., Vol. 399, S. 49-83.
- [GRI10] Griesheimer, S., Salun, L., Dörsam, E., Götz, P, Ibis, M. & Rausch, J. (2010). *Forming limit curves of flexible sensors on metal surfaces*. Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C), 2010 in Frankfurt, Poster Session, P3.10, S.302-304.
- [GRI11] Griesheimer, S. & Steffen, V. (2011). *Labormaschine für das funktionale Drucken im Siebdruckverfahren gemeinsam entwickelt*. Der Siebdruck, 57 (9), S. 12-13.
- [GRI12] Griesheimer, S. & Dörsam, E. (2012). *Ink splitting: The Influence of structured surfaces on the contact angle in flexo printing*. Iarigai, Advances in Printing and Media Technology, Vol. XXXIX, S. 175-179.
- [HAA12] Haas, M. (2012). *Untersuchungen zum Verdrucken von Interferenzeffektfarben im Flexodruckverfahren*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- [HAB09] Habenicht, G. (2009). *Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendung* (6., aktualisierte Auflage). Berlin: Springer Verlag.
- [HAS98] Hassager, O., Kolte, M. I. & Renardy, M. (1998). *Failure and nonfailure of fluid filaments in extension*. Journal Non-Newtonian Fluid Mech., 76, S. 137-151.
- [HEL98] Hele-Shaw, H. S. (1898). *The Flow of Water*. Nature, 58, S. 34-36.
- [HEN28] Hencky, H. (1928). *Über die Form des Elastizitätsgesetzes bei ideal elastischen Stoffen*. Zeitschrift für technische Physik, 9, S. 215–220.
- [HER02] Herberg, H. (2002). *Disperse und polare Anteile von Grenzflächen-Energien*. Verfügbar unter: http://w3-o.hm.edu/home/fb/fb06/professoren/herberg/texte/mikronanotechnik/vass/kap4_5.pdf [Juni, 2012].

- [HER08] Herminghaus, S., Brinkmann, M. & Seemann, R. (2008). *Wetting and Dewetting of Complex Surface Geometries*. Annual Review of Materials Research, 38, S. 101-121.
- [HOC76] Hocking, L. M. (1976). *A moving fluid interface on a rough surface*. Journal of Fluid Mechanics, 76, S. 801-817.
- [HOR03] Hornschuh, M. & Wolf, F. (2003). *Stabilität und Reproduzierbarkeit der Flexo-Druckform*. Auszüge aus dem DFTA-Symposium Herbst 2003.
- [HÜB91] Hübner, G. (1991). *Ein Beitrag zum Problem der Flüssigkeitsspaltung in der Drucktechnik*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.
- [IDE76] Ide, Y. & White, J. K. (1976). *The spinnability of polymer fluid filaments*. Journal Appl. Polym. Sci., 20, S. 2511-2531.
- [INS12] Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren [IDD] (2012). *LaboraAusstattung des CharakterisierungsLabors – Dehnrheometer HAAKE CaBER*. Verfügbar unter: http://www.idd.tu-darmstadt.de/re_search/equipm/characterization_lab/index.de.jsp [November, 2012].
- [ITW12] ITWissen (2012). *Dichroitischer Filter*. Verfügbar unter: <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Dichroitischer-Filter-dichroitic-filter.html> [November, 2012].
- [JAM94] James, D. F. & Walters, K. (1994). *A Critical Appraisal of Available Methods for the Measurement of Extensional Properties of Mobile Systems*. Techniques of Rheological Measurement, A.A. Collyer, Elsevier Science: New York.
- [JAM09] James, D. F. & Pouran, M. (2009). *Droplet formation in quickly stretched liquid filaments*. Rheol Acta, 48, S. 611-624.
- [JÄD05] Jäder, J., Willenbacher, N., Engström, G. & Järnström (2005). *The Influence of Extensional Properties on the dewatering of Coating Colors*. Journal of Pulp and Paper Science, 31(4), S. 181-187.
- [JUN92] Jung, U. (1992). *Ein Beitrag zur Benetzbarkeit rauer und poröser Festkörperoberflächen*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.
- [KAE65] Kaeble, D. H. (1965). Peel Adhesion: Micro-Fracture Mechanics of Interfacial Unbinding of Polymers. Trans. Soc. Rheol., 9, S. 135-163.

- [KAE71] Kaeble, D. H. (1971). *Cavitation in Viscoelastic Media*. Trans. Soc. Rheol., 15, S. 275-296.
- [KIP00] Kipphan, H. (2000). *Handbuch der Printmedien*. Berlin: Springer Verlag.
- [KIS12] Kistler Instrumente GmbH (2012). *1-Komponenten-Kraftmesselement Typ 9215*. Verfügbar unter: <http://www.kistler.com/de/de/product/force/9215> [November, 2012].
- [KLA11] Klauer, F. (2011). *Grenzflächen- und Materialanalytik*. Vorlesungsskript, Universität Innsbruck.
- [KON98] Kondic, L., Shelly, M. J. & Palffy-Muhoray, P. (1998). *Non-Newtonian Hele-Shaw Flow and Saffman-Taylor Instability*. Physical Review Letters, Vol. 80, No. 7, S. 1433-1436.
- [KÖN10] Königshausen & Neumann (2010). *Konzepte der Phänomenalen*. Würzburg.
- [KRU10] Krumpfer, J. W. & McCarthy, T. (2010). *Contact angle hysteresis: a different view and a trivial recipe for low hysteresis hydrophobic surfaces*. The Royal Society of Chemistry, Faraday Discussions, 146, 103-111.
- [KRÜ12] Krüss GmbH (2012). *Produktbeschreibung – KRÜSS DSA 100*. Verfügbar unter: <http://www.kruss.de/de/produkte/kontaktwinkel/dsa100/kontaktwinkel-messgeraet-dsa100e.html> [November, 2012].
- [LED12] Led-Info (2012). *Weißes LED*. Verfügbar unter: <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/weisslicht-led/lumineszenz-konversion.html> [November 2012].
- [LIN05] Lindner, A., Derks, D. & Shelley, M. J. (2005). *Stretch flow of thin layers of Newtonian liquids: Fingering patterns and lifting forces*. Physics of Fluids, 17, 072107.
- [MAK11] MAK-Bildtechnik (2011). *Datenblatt StrobeLED*. Wolfsburg: MAK-Bildtechnik.
- [MAN13] Manukyan, S. (2013). *Fundamental Investigation of Forced Wetting on Structured Surfaces*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- [MAR03] Marmur, A. (2003). *Wetting of Hydrophobic Rough Surfaces: To be heterogeneous or not to be*. Langmuir, 19 (20), S.8343–8348.

- [MCC95] McCloud, K. V. & Maher, J. V. (1995). *Experimental perturbations to Saffman-Taylor flow*. Physics Reports-Review Section of Physics Letters, 260, 139.
- [MCE66] McEwan, A. D. & Taylor, G. I. (1966). *The peeling of a flexible strip attached by a viscous adhesive*. Journal of Fluid Mechanics, 26, S. 1-15.
- [MCK97] McKinley, G. H. (1997). *Science Requirements Document for the Extensional Rheology Experiment*. Harvard University.
- [MCK99] McKiley, G. H., Anna, S. L., Tripathi, A. & Yao, M. (1999). *Extensional rheometry of polymeric fluids and the uniaxial elongation of viscoelastic filaments*. 15th Annual Meeting of the International Polymer Processing Society.
- [MCK00] McKinley, G. H., Anubhav, Tripathi (2000). *How to Extract the Newtonian Viscosity from Capillary Breakup Measurements in a Filament Rheometer*. Journal of Rheology.
- [MCK02] McKinley, G. H. & Sridhar, T. (2002). *Filament-Stretching Rheometry of Complex Fluids*. Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 34, S. 374-415.
- [MEI03] Meichsner, G., Mezger T. G. & Schröder, J. (2003). *Lackeigenschaften messen und steuern*. Hannover: Vincentz Network.
- [MEI06] Meier, C., Müller, L. (2006). *Fluid Mechanik*. Verfügbar unter: https://prof.hti.bfh.ch/uploads/media/F-HY-Td_02.pdf [Juni, 2012].
- [MEZ06] Mezger, T. G. (2006). *Das Rheologie Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*. Hannover: Vincentz Network.
- [MIC99] Michel, R. (1999). *Modellierung des Verhaltens von Papier und Gummituch im Druckspalt von Offsetdruckmaschinen*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz.
- [MIS07] Mischke, P. (2007). *Filmbildung in modernen Lacksystemen*. Hannover: Vincentz Network.
- [MOC04] Mock, U. (2004). *Über das Benetzungsverhalten polymermodifizierter Grenzflächen*. Dissertation, Alber-Ludwig-Universität Freiburg.

- [MOG10] Mognetti, B. M., Kusumaatmaja, H. & Yeomas, J. M. (2010). *Drop dynamics on hydrophobis and superhydrophobic surfaces*. The Royal Society of Chemistry, Faraday Discussions, 146, 133-153.
- [NAS09] Nase, J. (2009). *Debonding of Viscoelastic Materials: From a Viscous Liquid to a Soft Elastic Solid*. Dissertation, Universität des Saarlandes & Université Pierre et Marie Curie.
- [NEU09] Neumann, J. (2009). Methode zur Volumenstrommessung und zur Viskositätsregelung von Beschichtungsfluiden der grafischen Industrie. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- [NGU04] Nguyen, N.-T. (2004). *Mikrofluidik – Entwurf, Herstellung und Charakterisierung*. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag.
- [NOL10] Noll, F. (2010). *Grenzflächenchemie: Bestimmung der polaren und dispersen Anteile der Oberflächenspannung von Festkörpern mittels Kontaktwinkelmessungen*. Verfügbar unter: http://www.uni-marburg.de/fb15/studium/praktika/pcprakt/bachelor/skripte/pc4_03_kontaktwinkel.pdf [Juni, 2012].
- [OBE12] Oberle, T. (2012). *Herstellung von Flexodruckformen*. Seminararbeit, Technische Universität Darmstadt.
- [OKU08] Okumura, K.; Okumura, K (2008). *Wetting transitions on textured hydrophilic surfaces*. European Physical Journal, 25 (4), S. 415–424.
- [PAH91] Pahl, M., Gleissle, W. & Laun, H. (1991). *Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere*, VDI Verlag.
- [PAT81] Paterson, L. (1981). *Radial fingering in a Hele Shaw cell*. Journal Fluid Mechanics, 113, S. 513-529.
- [PEN11] Peng, G., Yongmei, Z., Chengcheng L., Jie, J. & Lei, J. (2011). *Directional shedding-off water on natural/bio-mimetic taper-ratchet array surfaces*. The Royal Society of Chemistry, Electronic Supplementary Material [ESI], 8, 1770-1775.
- [PET05] Pettinger, S. (2005). *Thermo-fluiddynamische Eigenschaften von Brandunterdrückungslöschern mit Gasgeneratoren*. Dissertation, Technische Universität München.

- [PET06] Pertie, J. S. (2006). *Extensional viscosity: A critical discussion*. Journal of Non-Newtonian Fluid mechanics, 137, S. 15-23.
- [PHO09] Photron (2009). *Photron Fastcam Viewer - User's Manual* (Version 3.0 / Revision 1.06E). Tokyo: Photron Limited.
- [POP09] Popov, V. L. (2009). *Kontaktmechanik und Reibung*. Berlin: Springer Verlag.
- [PRÄ12] Präzisions Glas & Optik (2012). *Enhanced Aluminium Oberflächenspiegel mit dielektrischer Verstärkerschicht*. Verfügbar unter: http://www.pgo-online.com/de/katalog/liste_oberflaechenspiegel.html [November, 2012].
- [PUR77] Purcell, E. M. (1977). *Life at low Reynolds Number*. American Journal Physics, Vol. 45, No. 1, S. 3-11.
- [RAS74] Rasmussen, H.K. & Hassager, O. (1974). *Three-dimensional simulations of viscoelastic instability in polymeric filaments*. J. Non-Newtonian Fluid Mech., 82, S. 189-202.
- [RAS99] Rasmussen, H. K. & Hassager, O. (1999). *Three-dimensional simulations of viscoelastic instability in polymeric Filaments*. Journal Non-Newtonian Fluid Mechanics, 82, S. 189-202.
- [RAS01] Rasmussen, H. K. & Hassager, O. (2001). *The Role of Surface Tension in the Elastic Decohesion of Polymeric Filaments*. Journal Rheology, 45, S. 527-537.
- [RAU12] Rausch, J., Werthschützky, R., Salun, L. & Griesheimer, S. (2012). *Piezoresistive Dehnungsmesselemente für adaptronische Systeme*. Technisches Messen, tm 7-8/2012, S. 366-373.
- [REI64] Reiner, M. (1964). *The Deborah Number*. Physics Today, Band 17, Nr. 1, S. 62.
- [REY86] Reynolds, O. (1886). *On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Towers's Experiments*. Phil. Trans. Roy. Soc. London, 177, S. 157-234.
- [ROD05] Rodd, L. E., Scott, T. P., Cooper-White, J. J. & McKinley, G. H. (2005). *Capillary Break-up Rheometry of Low-Viscosity Elastic Fluids*. Applied Rheology, 15, S. 12-27.

- [ROI10] Roisman, I. V. (2010). *On the instability of a free viscous rim*. J. Fluid Mech., S. 1 of 23.
- [ROI12] Roisman, I.V. (2012). *Strömungsmechanik neuer Technologien*. Vorlesungsskript, Technische Universität Darmstadt.
- [ROT02] Rothstein, J. P. & McKinley, G. H. (2002). *Inhomogeneous transient uniaxial extensional rheometry*. Journal Rheology, 46(6), S. 1419-1443.
- [SAF58] Saffman, P. G. & Taylor, G. (1958). *The Penetration of a Fluid into a Porous Medium or Hele-Shaw Cell Containing a More Viscous Liquid*. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Science, Vol. 245, No. 1242, S. 312-329.
- [SAL13] Salun, L. (2013). *Methode zur Beschreibung von Piezo-Injektsystemen mit der Netzwerktheorie am Beispiel eines Labordruckers*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- [SAT08] Sattler, R., Wagner, C. & Eggers, J. (2008). *Blistering Pattern and Formation of Nanofibers on Capillary Thinning of Polymer Solutions*. Phys. Rev. Lett., 95, 164504.
- [SCH72] Schwatz, A. M. & Tejada, S. B. (1972). *Studies of dynamic contact angles on solids*. Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 38, Issue 2, S. 359-375.
- [SCH95] Schramm, G.(1995). *Einführung in die Rheologie und Rheometrie* (Band 2). Karlsruhe: Gebrüder Haake.
- [SCH04] Schubert, E.F. (2004). *Light-Emitting Diodes*. Verfügbar unter: <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap21/F21-08%252520Spectrum%252520white%252520P%252520LED.jpg&w=976&h=393&ei=h16qULWfIaiF4gTH4oD4Dw&zoom=1&iact=rc&dur=311&sig=116067994052462946410&page=1&tbnh=99&tbnw=248&start=0&ndsp=25&ved=1t:429,r:6,s:0,i:87&tx=93&ty=31> [November, 2012].
- [SCH07] Schmitz, H. & Valentin, J. (2007). *Konfokalmikroskop – Für die präzise und schnelle 3D-messung von Oberflächen in Labor und Produktion*. Verfügbar unter: http://www.nanofocus.de/fileadmin/user_upload/download/NanoFocs-Praxis_Profiline_06-Praezise_und_schnelle_Messung.pdf [Oktober, 2012].

- [SCH08] Schubert, S. (2008). *Rheologische Untersuchungen an Polyisobutylenen und Polyacrylamidelösungen mit einem neuartigen optischen Dehnrheometer*. Dissertation, Technische Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg.
- [SCH11] Schmitz, J. (2011). *Untersuchung der Anisotropie im Benetzungsverhalten flüssiger Al-Cu Legierungen auf einkristallinen orientierten Al_2O_3* . Dissertation, RWTH Aachen.
- [SEN09] Sensofar (2009). *Datenblatt*. Verfügbar unter: http://www.sensofar.com/pdf/PLu_neox.pdf [Oktober, 2012].
- [SHE97] Shelley, M. J., Tian, F. & Wlodarski, K. (1997). *Hele-Shaw flow and pattern formation in a time-dependant gap*. Nonlinearity, 10, S. 1471-1495.
- [SIE07_a] Siegwerk Switzerland (2007). *UV-Flexodruckfarbe Sicura Flex 39-6*. Technisches Merkblatt, Siegwerk Druckfarben.
- [SIE07_b] Siegwerk Switzerland (2007). *UV-Flexodruckfarbe Sicura Flex 36-2*. Technisches Merkblatt, Siegwerk Druckfarben.
- [SIE12] Siegwerk Backnang (2012). *Produktinformation -Aqualabel Black 774083S*. Sicherheitsdatenblatt, Siegwerk Druckfarben.
- [SIG12] Sigloch, H. (2012). *Technische Fluidmechanik* (8. Auflage). Berlin: Springer Verlag.
- [SPI96] Spiegelberg, S. H. & McKinley, G. H. (1996). *Stress relaxation and elastic decohesion of viscous polymer solutions in extensional flow*. Journal Non-Newtonian Fluid Mechanics, 67, S. 49-76.
- [SPO10] Spori, D. M. (2010). *Structral Influences on Self-cleanig Surfaces*. Dissertation. ETH Zürich.
- [SPU07] Spurk, J. H. & Aksel, N. (2006). *Strömungslehre – Einführung in die Theorie der Strömung* (7. Auflage). Berlin: Springer Verlag.
- [SRI90] Sridhar, T., Tirtaatmadja, V., Nguyen, D.A. & Gupta, R.K. (1990). *An Overview of the Project M1*. Journal Non-Newtonian Fluid Mechanics, 35, S. 86-92.
- [SRI91] Sridhar, T., Tirtaatmadja, V., Nguyen, D. A. & Gupta, R. K. (1991). *Measurement of Extensional Viscosity of Polymer Solutions*. Journal Non-Newtonian Fluid Mechanics, 40, S. 271-280.

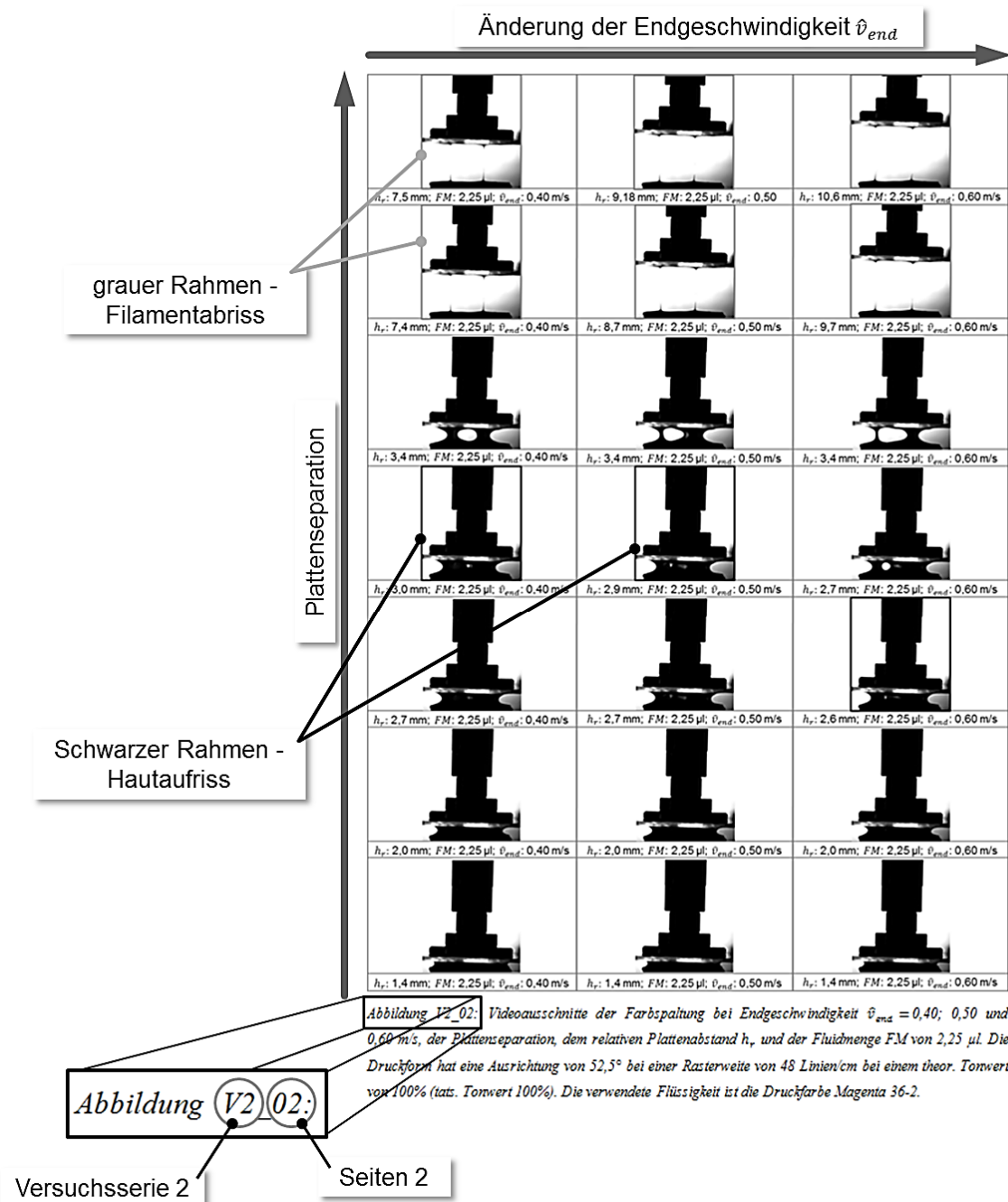
- [STA09] Stahl, S. (2009). *Drucktechnologie für das Drucken funktionaler Strukturen*. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt.
- [STE09] Stephan, P. & Schaber, K. (2009). *Thermodynamik (18. Auflage)*. Berlin: Springer Verlag.
- [SZA97] Szabo, P. (1997). Transient Filament Stretching Rheometer I: Force Balance Analysis. *Rheol. Acta*, 36, S. 277-284.
- [TAF04] Tafelmeier, E. (2004). *UV-Strahlungshärtungs-Technologien*. Verfügbar unter: <http://www.coates.de/snd/uvstrahlung.pdf> [November, 2012].
- [TAY59] Taylor, G. I. (1959). *The dynamics of thin sheets of fluid. Part 2. Waves on fluid sheets*. *Proc. R. Soc. Lond.*, 1959b, A 263, S. 296–312.
- [TAY63] Taylor, G. I. (1963). *Cavitation of viscous fluid in narrow passages*. *Journal Fluid Mechanics*, 16, S. 595-619.
- [THE03] Thermo Haake (2003). *Instruction Manuel HAAKE CaBER 1*. Verfügbar unter: http://www.rheowin.com/files/Manual_CaBER1_v.1.2_%28E%29.pdf [November, 2012].
- [THE09] Thermo Scientific (2009). *Produktspezifikationen - HAAKE CaBER 1*. Produktbeschreibung, Thermo Fisher.
- [THE12] Thermo Scientific (2012). *HAAKE MARS Rotational Rheometer*. Verfügbar unter: http://www.thermoscientific.com/ecom/servlet/productsdetail_11152___12769395_-1 [November, 2012].
- [TIR93] Tiratmadja, V. & Sridhar, T. (1993). *A Filament Stretching Device for Measurement of Extensional Viscosity*. *Journal Rheology*, 37(6), S. 1081-1102.
- [TRO06] Trouton, F.T. (1906). *On the coefficient of viscous traction and its relation to that of viscosity*. *Proc. Roy. Soc. London*, 77, S. 426-440.
- [TRO07] Tropea, C., Yarin, A. & Foss, J. (2007). *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- [ÜCÜ12] Ücücü, M. (2012). *Grundlagenuntersuchung der Fluidspaltung zwischen zwei strukturierten Oberflächen*. Bachelorthesis. Technische Universität Darmstadt.

- [VAR02] Varela López, F., Pauchard, L., Rosen, M. & Rabaud, M. (2002). *Non-Newtonian effects on ribbing instability threshold*. Journal Non-Newtonian Fluid Mech., 103, S. 123-139.
- [VID12] Video Kommunikation GmbH – Technisches Fernsehen [VKT] (2012). *Photron Fastcam SA4 – Datenblatt*. Verfügbar unter: http://www.vkt.de/fileadmin/redakteur/pdf/neue_datenblaetter/vkt_SA4_Datenblatt.pdf [November 2012].
- [VOL06] Voltaire, J. (2006). *Ink film splitting acoustics in offset printing*. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology Stockholm.
- [VOS00] Voß, Ch. (2000). *Analytische Modellierung, experimentelle Untersuchung und dreidimensionale Gitter-Boltzmann Simulation der quasistatischen und instabilen Farbspaltung*. Dissertation, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal.
- [WAG64] Wagenbauer, K. (1964). *Studien zum Farbübertragungsprozess im Druckwerk*. Habilitation. Technische Hochschule Darmstadt.
- [WHY08] Whyman, G., Bormashenko, E. & Stein, T. (2008). *The rigorous derivation of Young, Cassie–Baxter and Wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresis phenomenon*. Chemical Physics Letters 450 (4–6), S. 355–359.
- [WEI12] Weickgenannt, C. M., Roisman, I. V. & Tropea, C. (2012). *Experimental investigation of liquid ligament fragmentation*. ICLASS 2012, 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Heidelberg.
- [WEL00] Welsh, R. D. (2000). *Viscoelastic Free Surface Instabilities During Exponential Stretching*. Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [WEN36] Wenzel, R. N. (1936). *Resistance of solid surfaces to wetting by water*. Ind. Chem. Eng., 28 (8), S. 988-994.
- [WIE83] Wiesner, R. & Scheuter, K. R. (1983). *Ermittlung von Farbspaltungsfaktoren in Walzenfarbwerken*. Institutsbericht des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Hochschule Darmstadt.
- [WIL01] Wilson, M. C. T., Gaskell, P. H. & Savage, M. D. (2001). *Flow in a double-film-fed fluid bead between contra-rotating rolls – Part 1: equilibrium flow structure*. Euro. Journal of Applied Mathematics, vol. 12, S. 395-41.

- [WIR63] Wirz, B. (1963). *Beiträge zum Problem der Auslegung von Farbwerken an Rotationsmaschinen des Hoch- und Flachdruckes*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.
- [XIU06] Xiuyan, Yin & Satish, Kumar (2006). *Flow visualization of the liquid-emptying process in scaled-up gravure grooves an cells*. Chemical Engineering Science, 61, S. 1146-1156.
- [YAO98] Yao, M. & McKinley, G. H. (1998). *Numerical Simulation of extensional deformations of viscoelastic liquid bridges in filament stretching*. Journal Non-Newtonian Fluid Mech., 74, S. 47-88.
- [YAR04] Yarin, A.L., Zussman, E. & Theron, a. (2004). *Elongational behavior of gelled propellant simulants*. J. Rheol. 48 (1), S. 101-116
- [ZEV05] Zevallos, G. A., Carvalho, M. S. & Pasquali (2005). *Forward roll coating flows of viscoelastic liquids*. Journal Non-Newtonian Fluid Mech., 130, S. 96-109.
- [ZIM10] Zimmer, L. (2010). *Dreidimensional nanostrukturierte und superhydrophobe mikrofluidische Systeme zur Tröpfchengenerierung und – handhabung*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie.
- [ZOS89] Zosel, A. (1989). *Physical Properties and Adhesion Performance of Pressure Sensitive Adhesives*. Adhesives Age, 32, S. 42-47.

Anhang

Im vorliegenden Anhang werden die Videoausschnitte der Highspeed-Aufnahmen der einzelnen Versuchsserien aufgeführt. Mit der folgenden Abbildung wird die Darstellung des Bildmaterials deutlich.



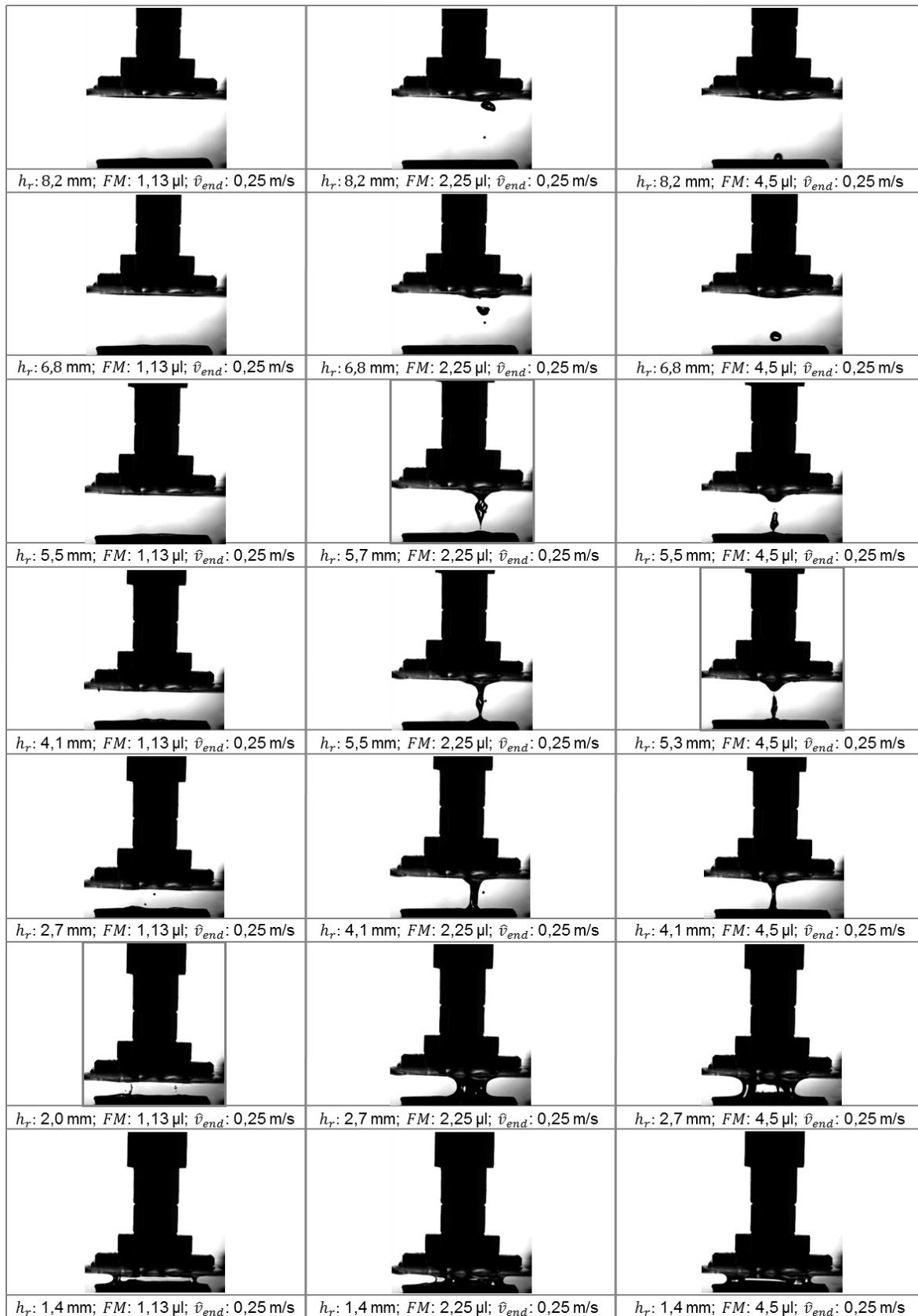


Abbildung VI_01: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,25 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μl . Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 100 % (tats. Tonwert 100 %). Die verwendete Flüssigkeit ist destilliertes Wasser.

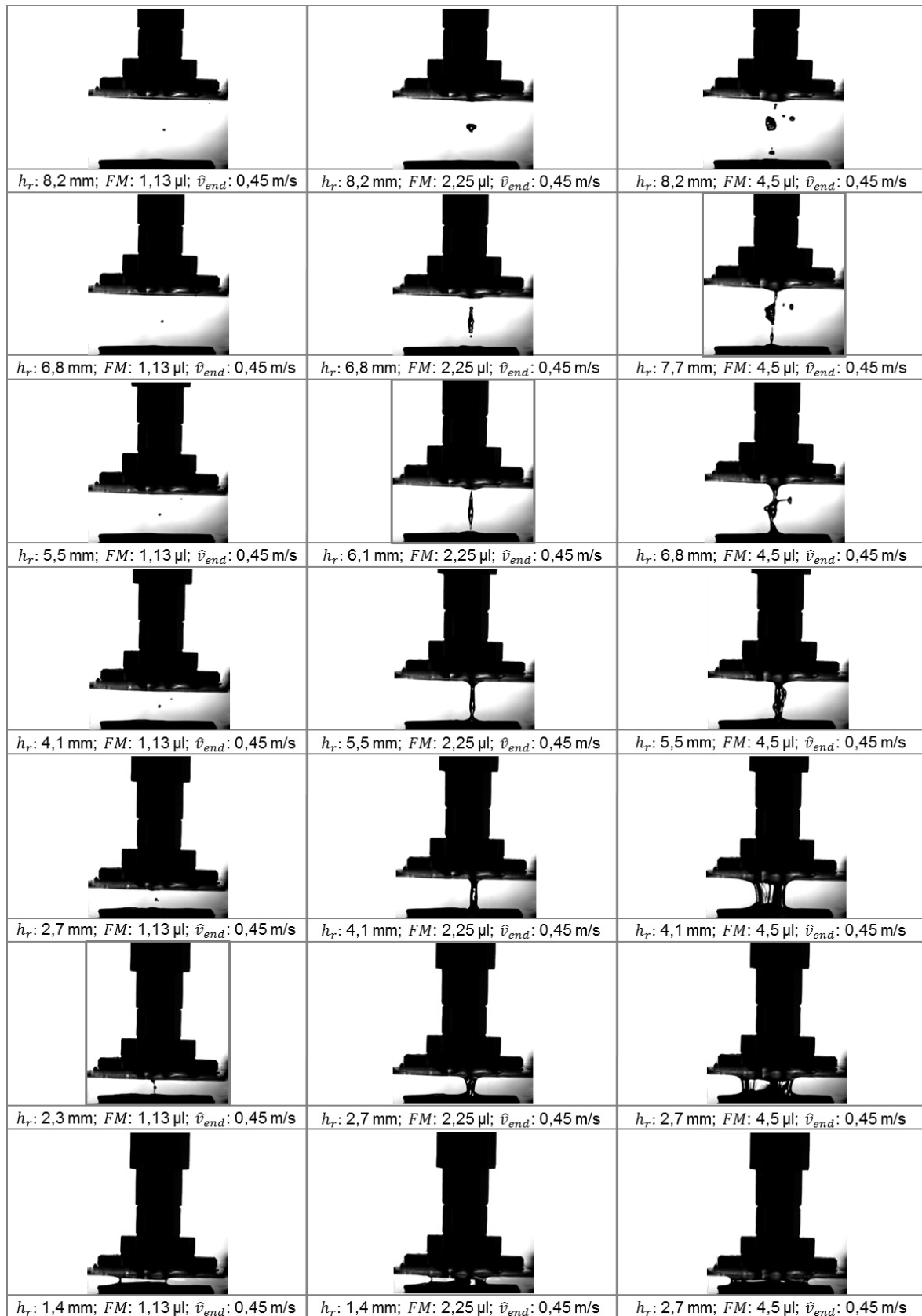


Abbildung VI_02: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,45 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μl . Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 100 % (tats. Tonwert 100 %). Die verwendete Flüssigkeit ist destilliertes Wasser.

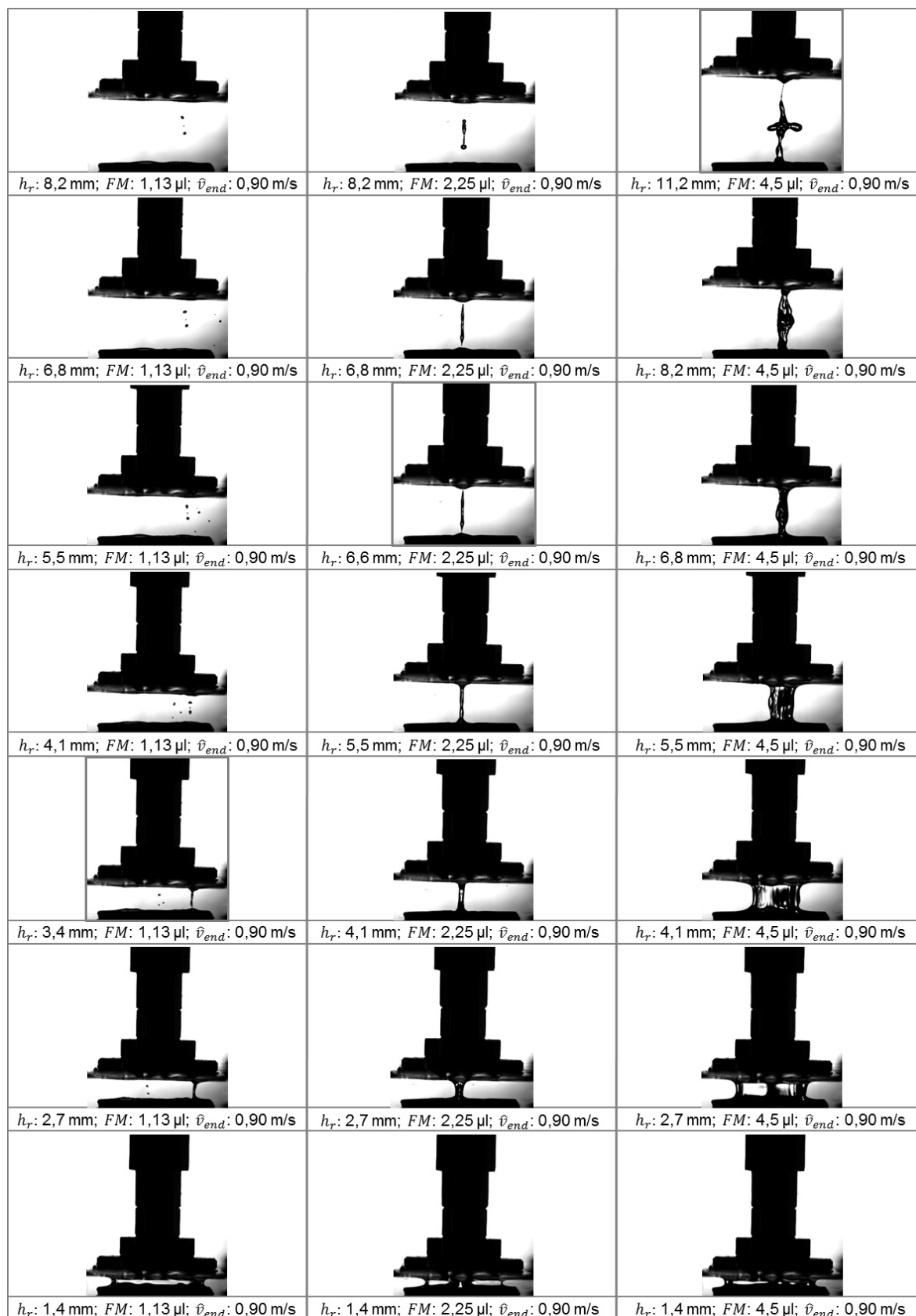


Abbildung VI_03: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,90 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μl . Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 100 % (tats. Tonwert 100 %). Die verwendete Flüssigkeit ist destilliertes Wasser.

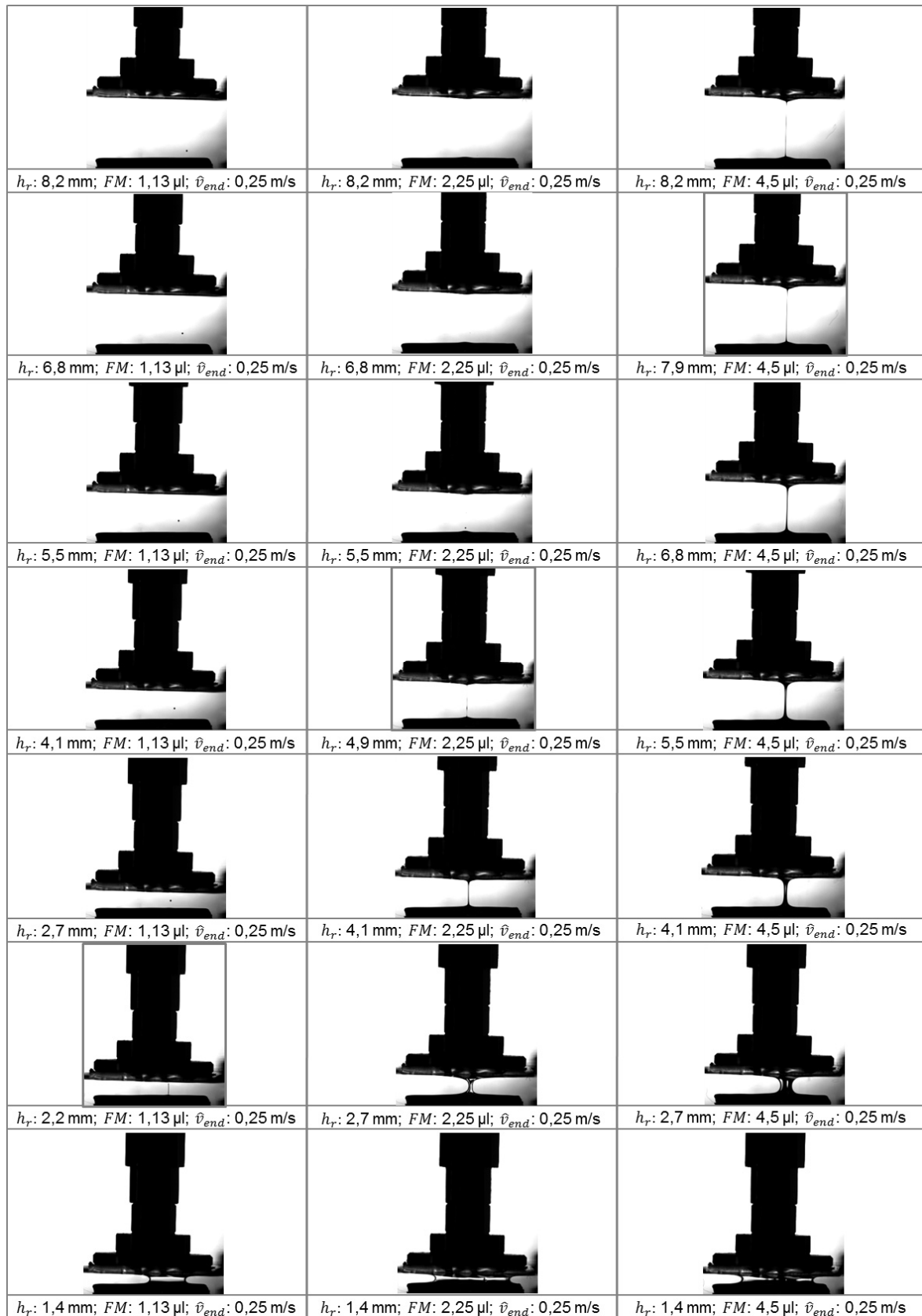


Abbildung VI_04: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,25 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μl . Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 100 % (tats. Tonwert 100 %). Die verwendete Flüssigkeit ist Glycerin.

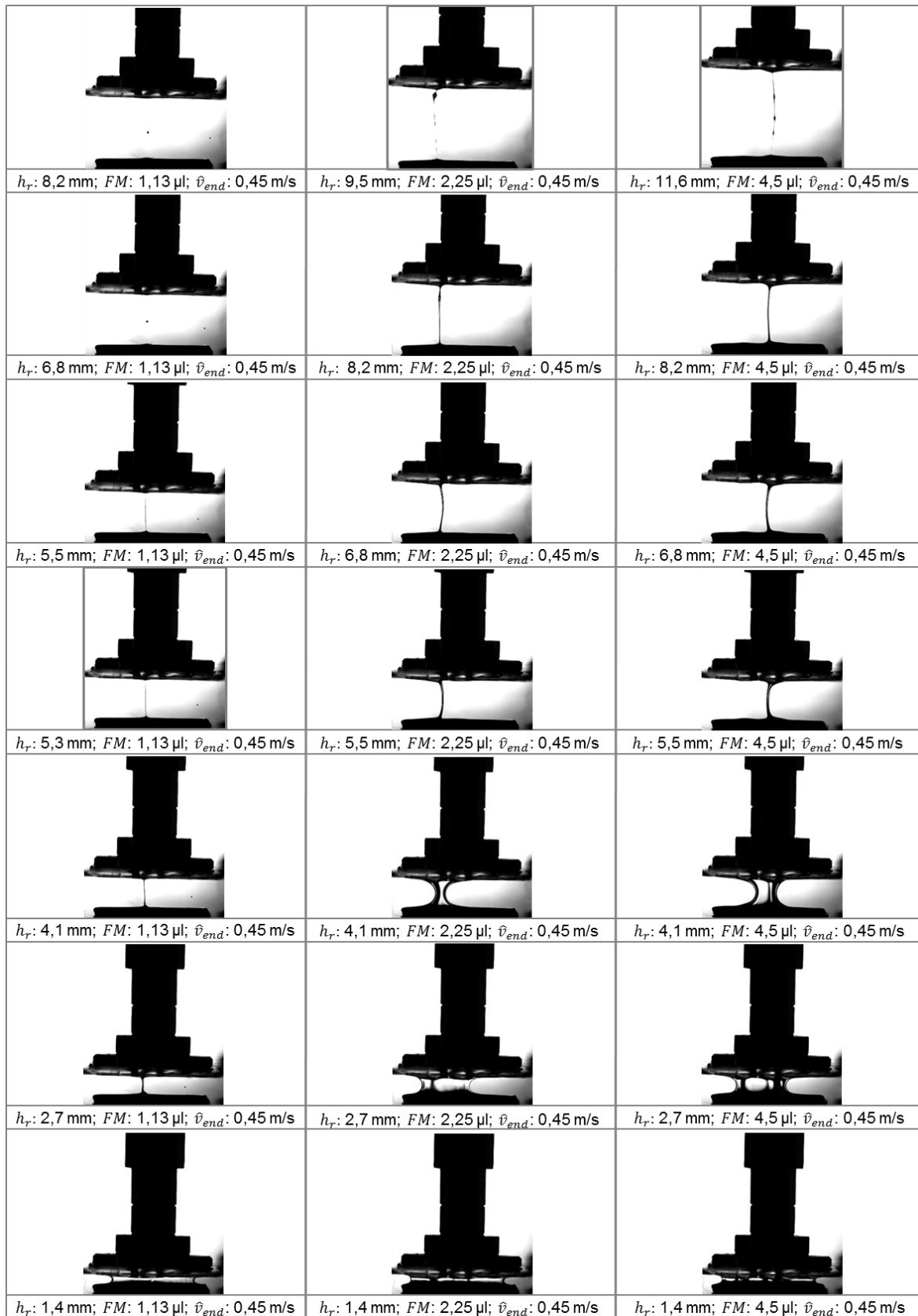


Abbildung VI_05: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,45 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μl . Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 100 % (tats. Tonwert 100 %). Die verwendete Flüssigkeit ist Glycerin.

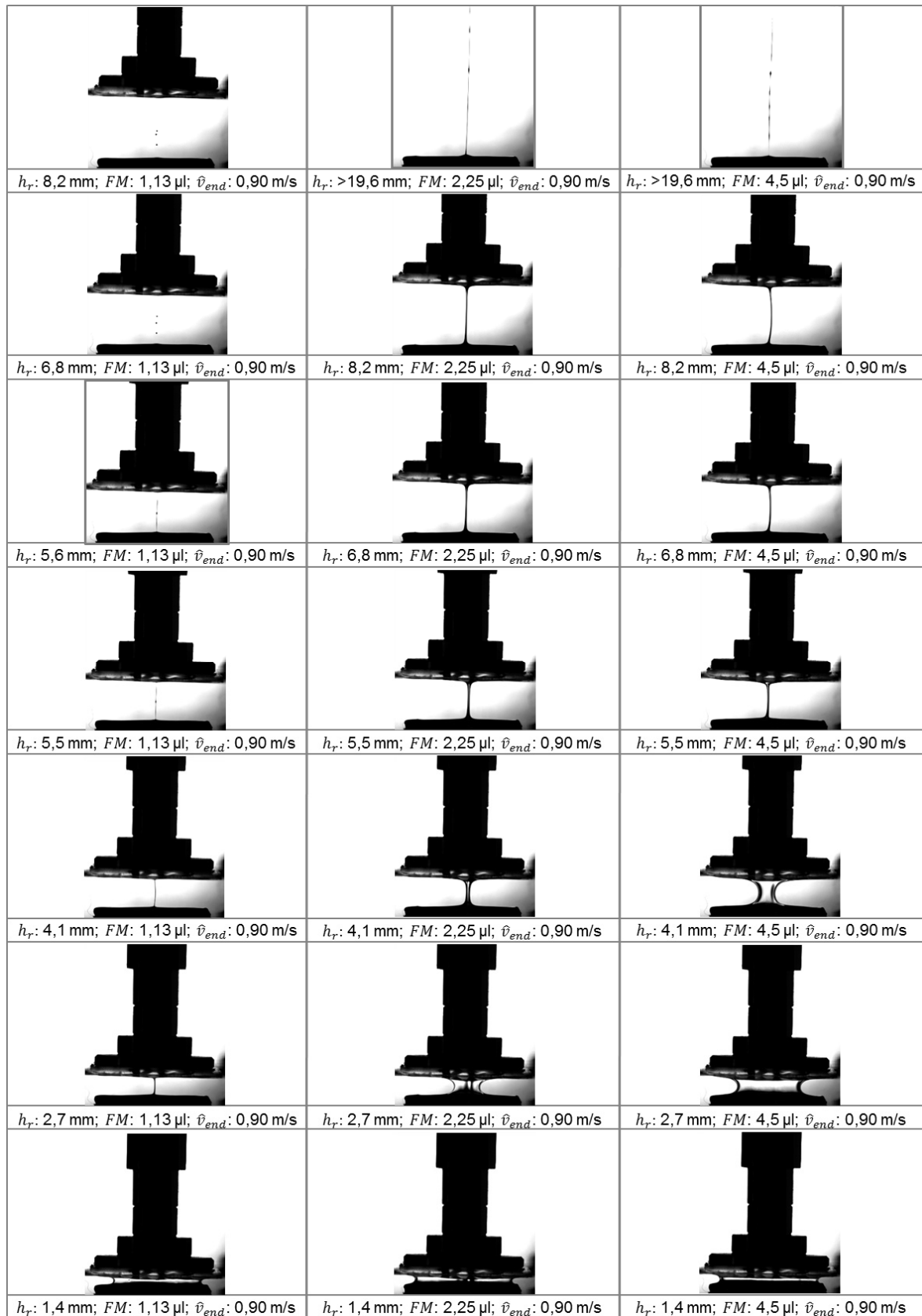


Abbildung VI_06: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,90 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μl . Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 100 % (tats. Tonwert 100 %). Die verwendete Flüssigkeit ist Glycerin.

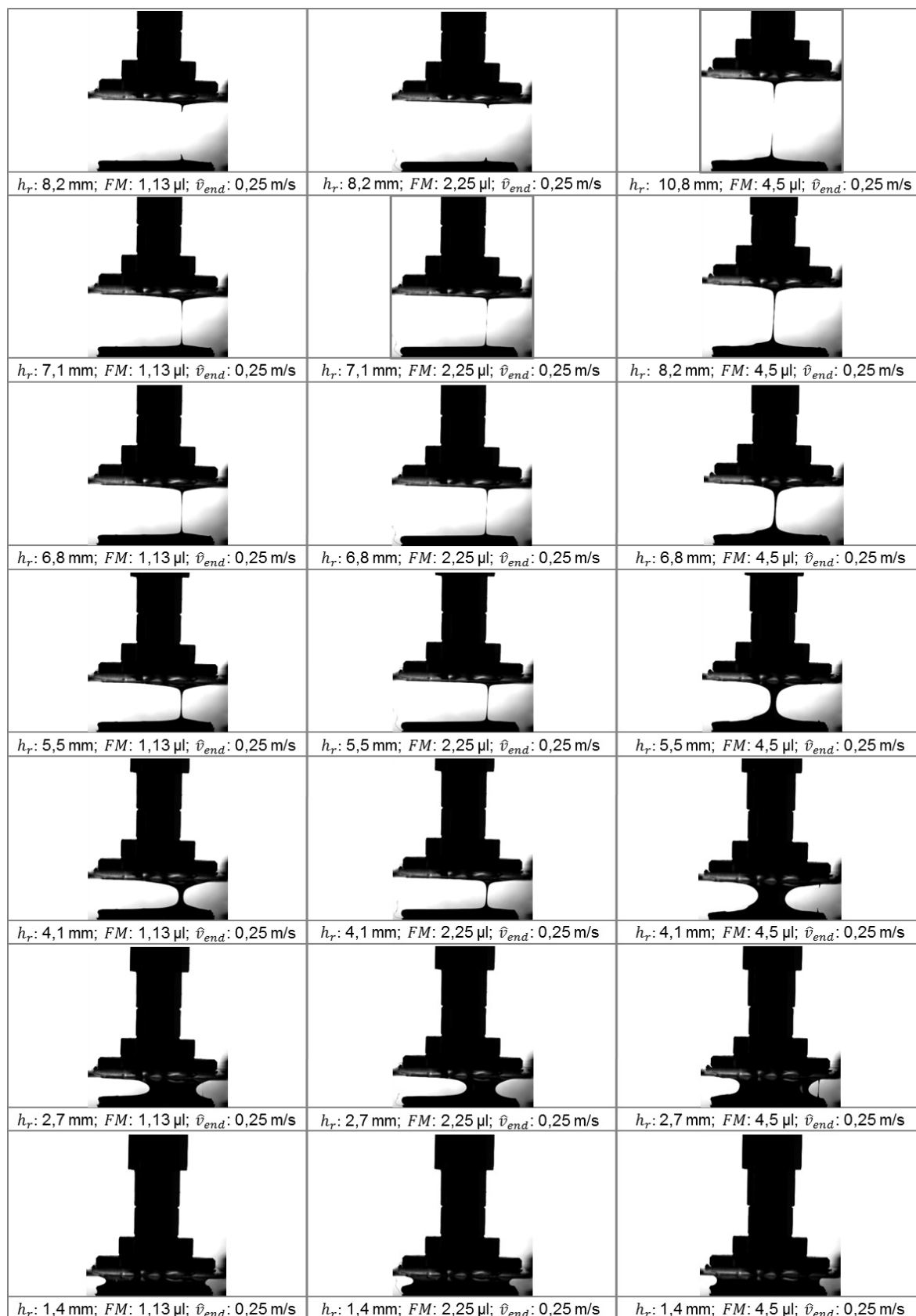


Abbildung VI_07: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,25 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μl . Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 100 % (tats. Tonwert 100 %). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

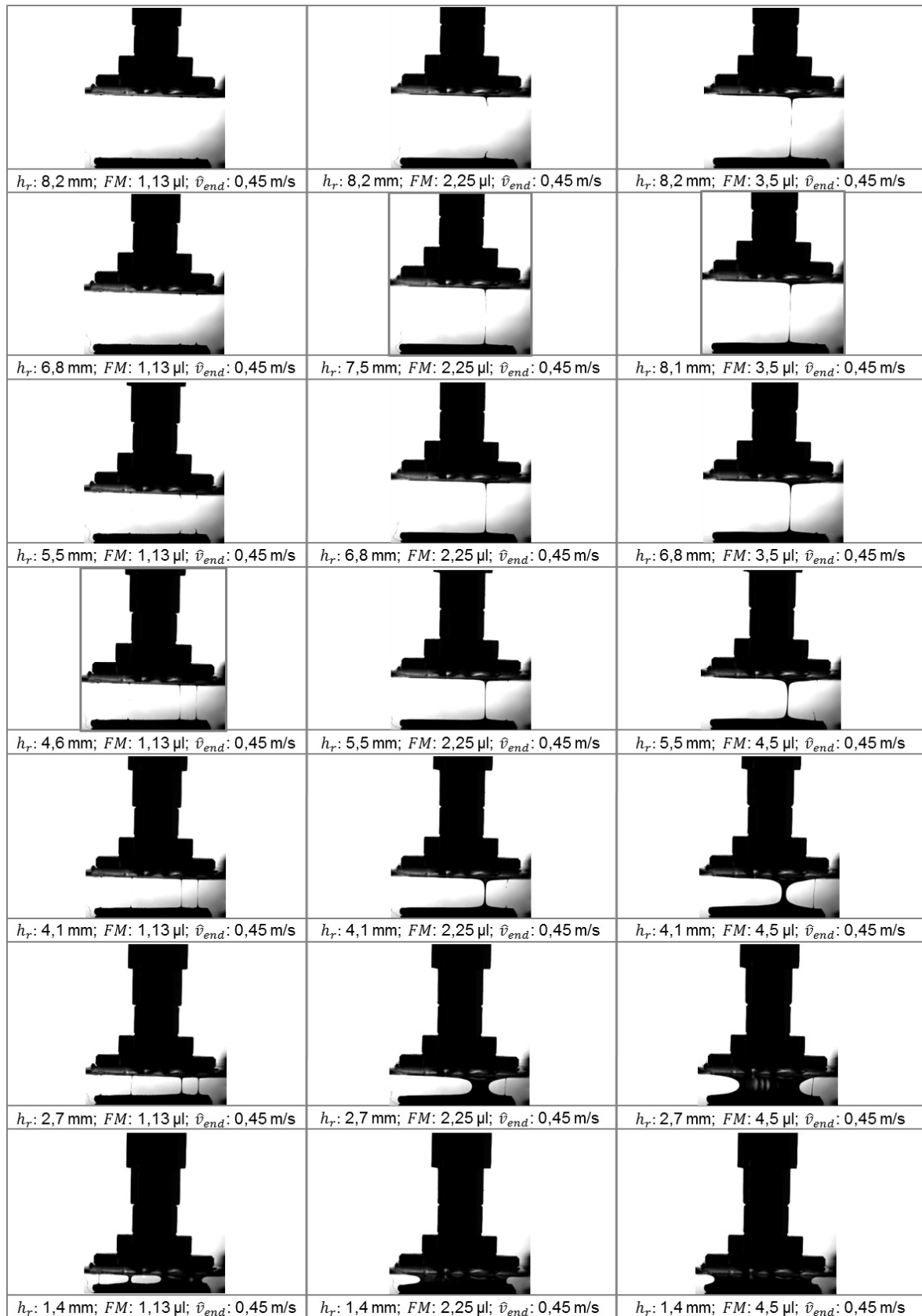


Abbildung VI_08: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,45$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μ l. Die Druckform hat eine Ausrichtung von 52,5° bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 100 % (tats. Tonwert 100 %). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

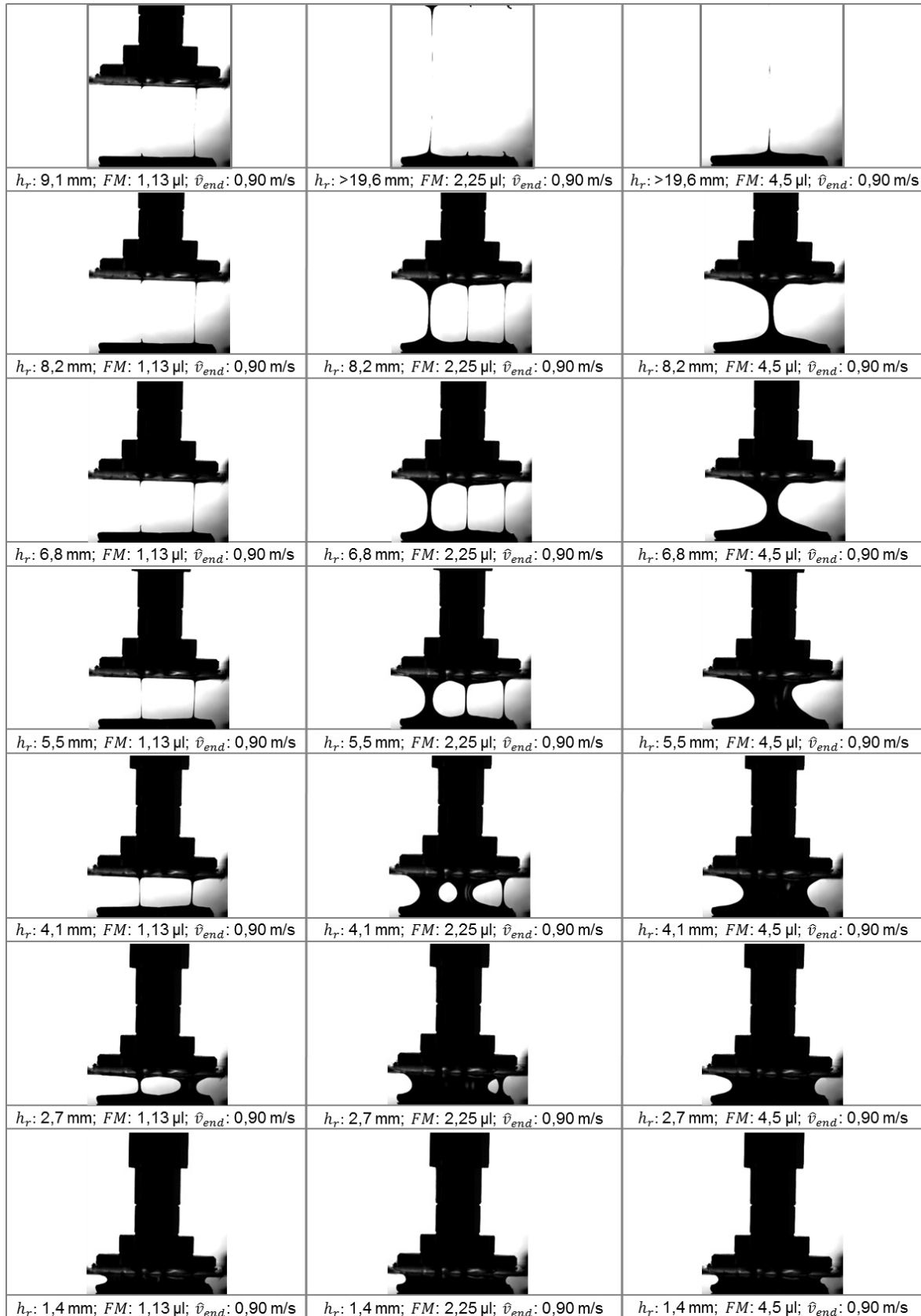


Abbildung VI_09: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,90 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μl . Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 100 % (tats. Tonwert 100 %). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

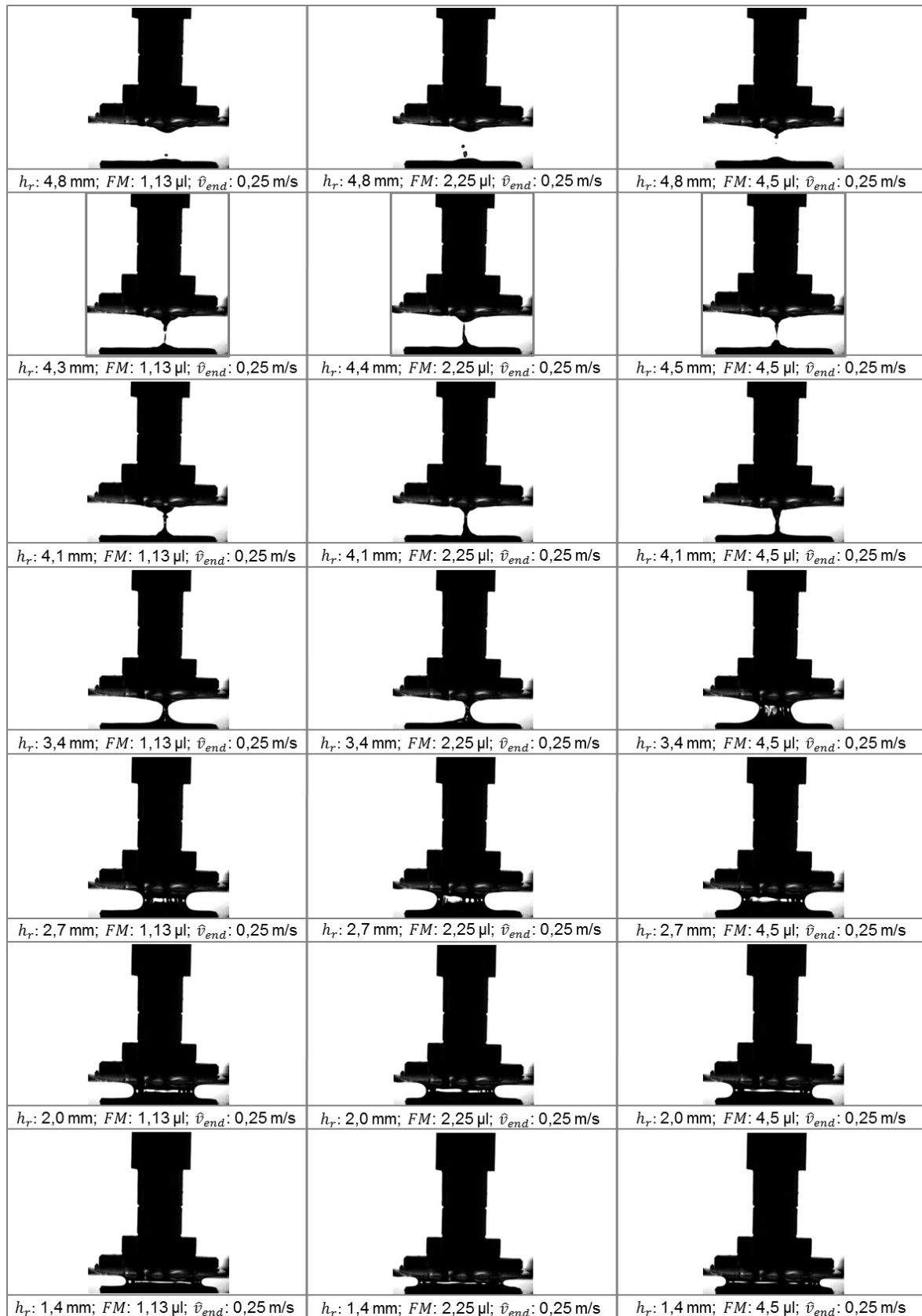


Abbildung VI_10: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,25$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μ l. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 60% (tats. Tonwert 56,53%). Die verwendete Flüssigkeit ist destilliertes Wasser.

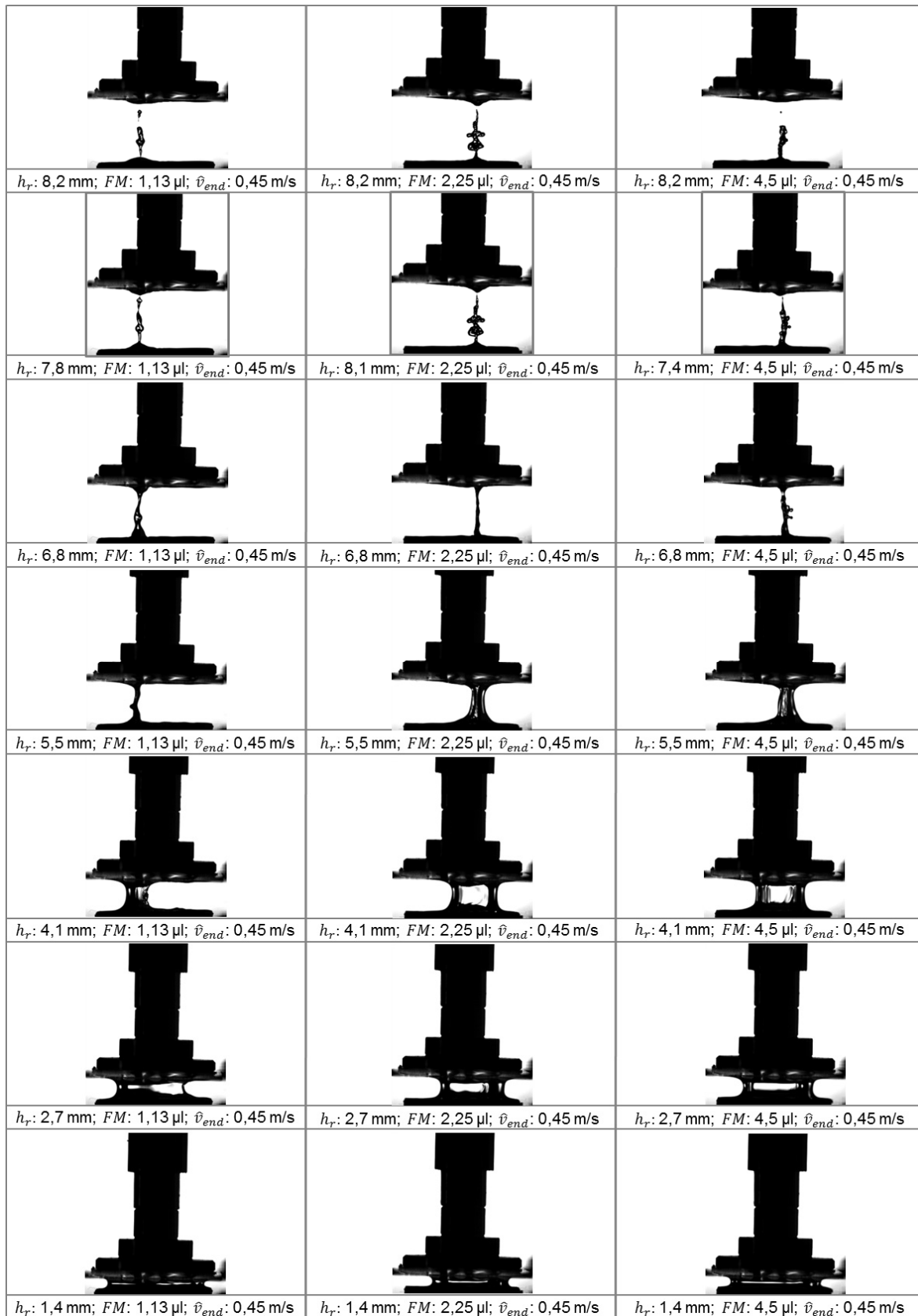


Abbildung VI_11: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,45 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μl . Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 60% (tats. Tonwert 56,53%). Die verwendete Flüssigkeit ist destilliertes Wasser.

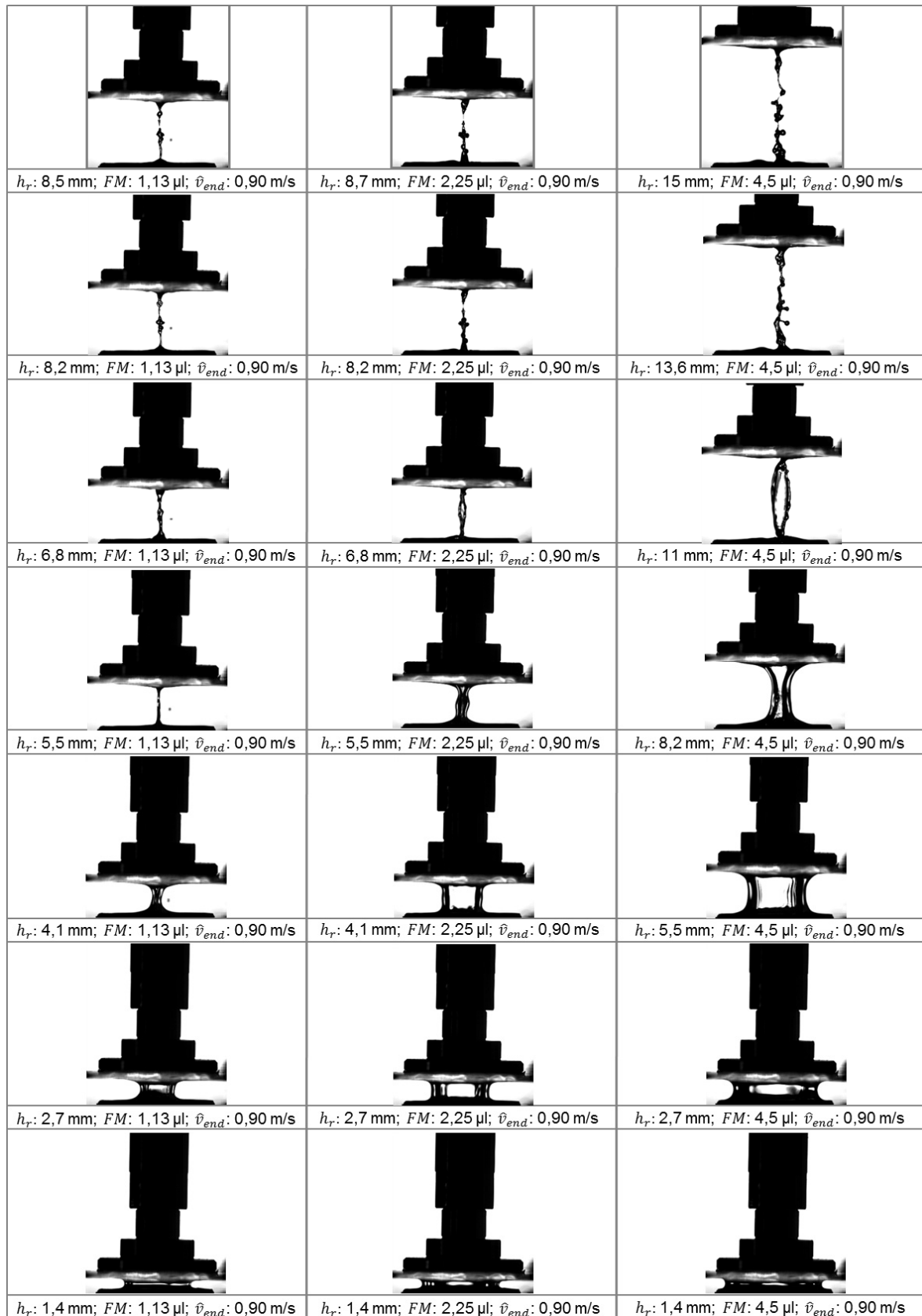


Abbildung VI_12: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,90 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μl . Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 60% (tats. Tonwert 56,53%). Die verwendete Flüssigkeit ist destilliertes Wasser.






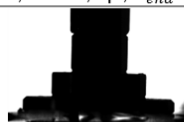
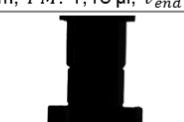
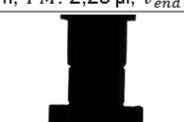
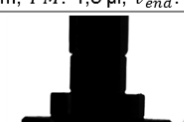
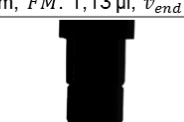
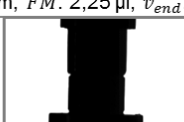




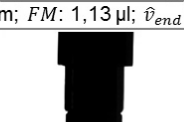
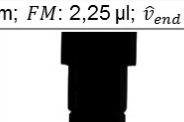
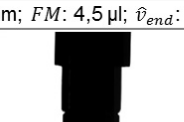


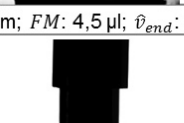
		
$h_r: 8,2 \text{ mm}; FM: 1,13 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 8,2 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 8,7 \text{ mm}; FM: 4,5 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$
		
$h_r: 6,8 \text{ mm}; FM: 1,13 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 6,8 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 8,2 \text{ mm}; FM: 4,5 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$
		
$h_r: 5,5 \text{ mm}; FM: 1,13 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 5,5 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 6,8 \text{ mm}; FM: 4,5 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$
		
$h_r: 4,1 \text{ mm}; FM: 1,13 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 5,0 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 5,5 \text{ mm}; FM: 4,5 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$
		
$h_r: 3,3 \text{ mm}; FM: 1,13 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 4,1 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 4,1 \text{ mm}; FM: 4,5 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$
		
$h_r: 2,7 \text{ mm}; FM: 1,13 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 2,7 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 2,7 \text{ mm}; FM: 4,5 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$
		
$h_r: 1,4 \text{ mm}; FM: 1,13 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 1,4 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$	$h_r: 1,4 \text{ mm}; FM: 4,5 \text{ } \mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,25 \text{ m/s}$

Abbildung VI_13: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,25 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μl . Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 60% (tats. Tonwert 56,53%). Die verwendete Flüssigkeit ist Glycerin.

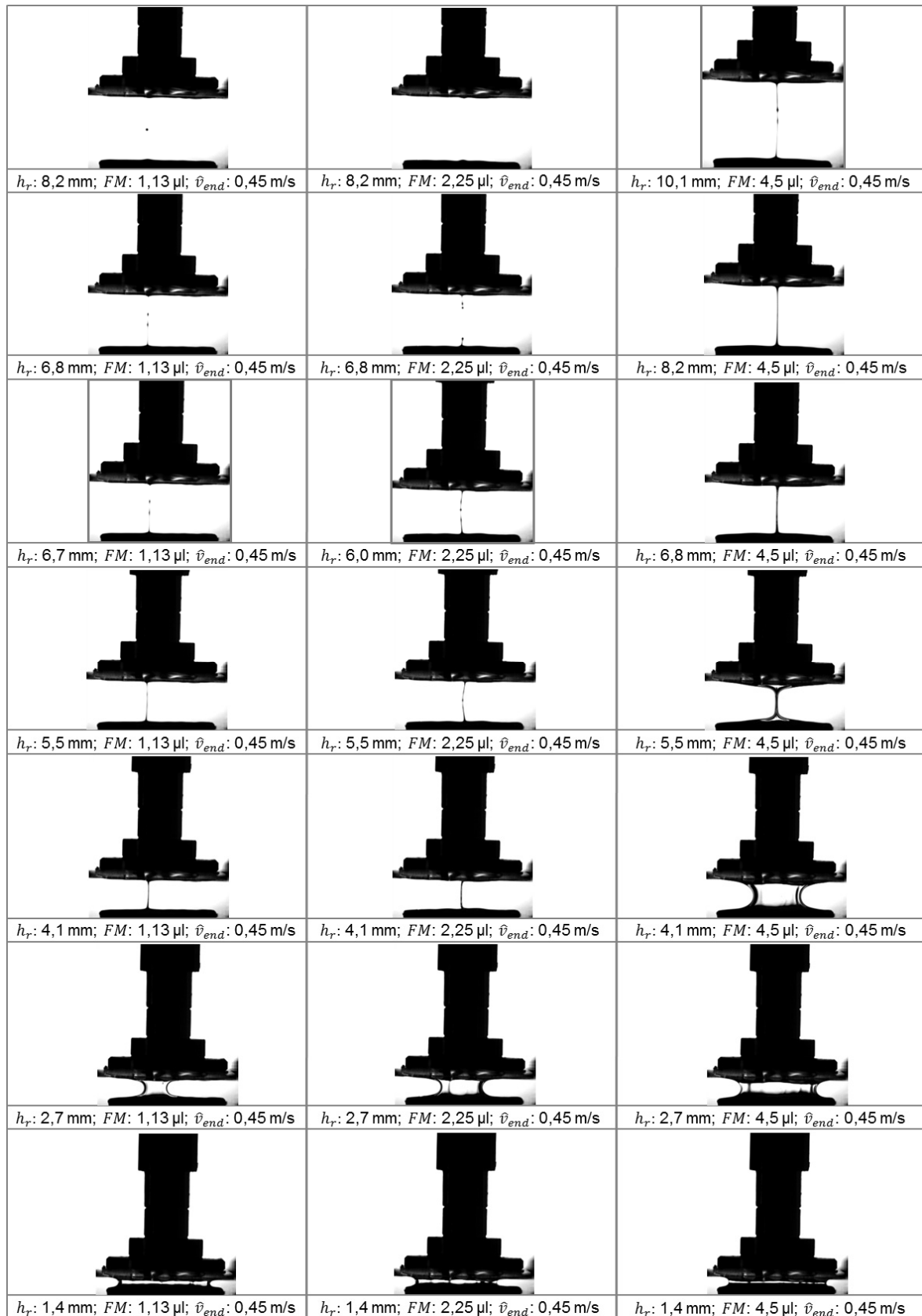


Abbildung VI_14: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,45$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μ l. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 60% (tats. Tonwert 56,53%). Die verwendete Flüssigkeit ist Glycerin.

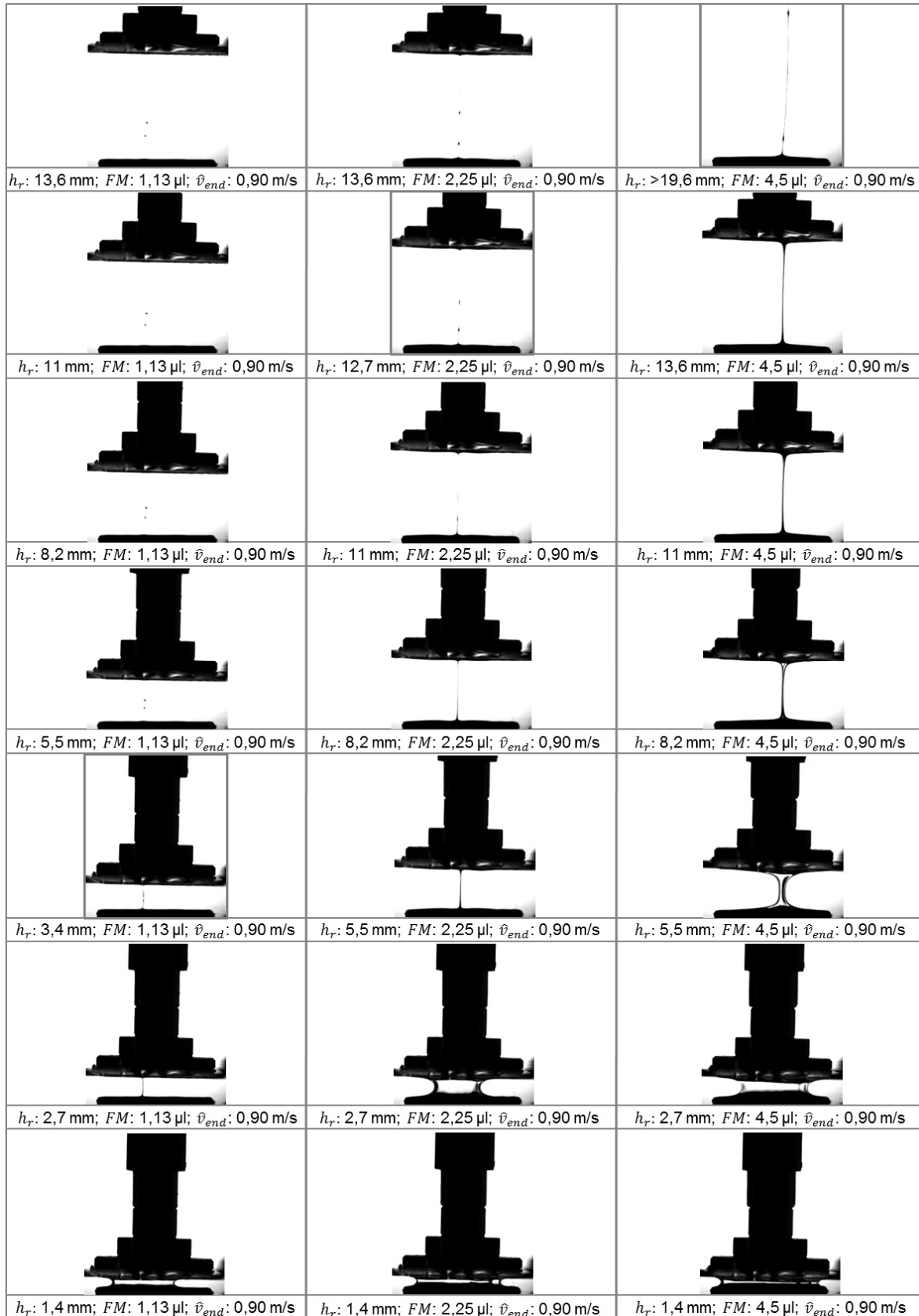


Abbildung VI_15: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,90$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μ l. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 60% (tats. Tonwert 56,53%). Die verwendete Flüssigkeit ist Glycerin.

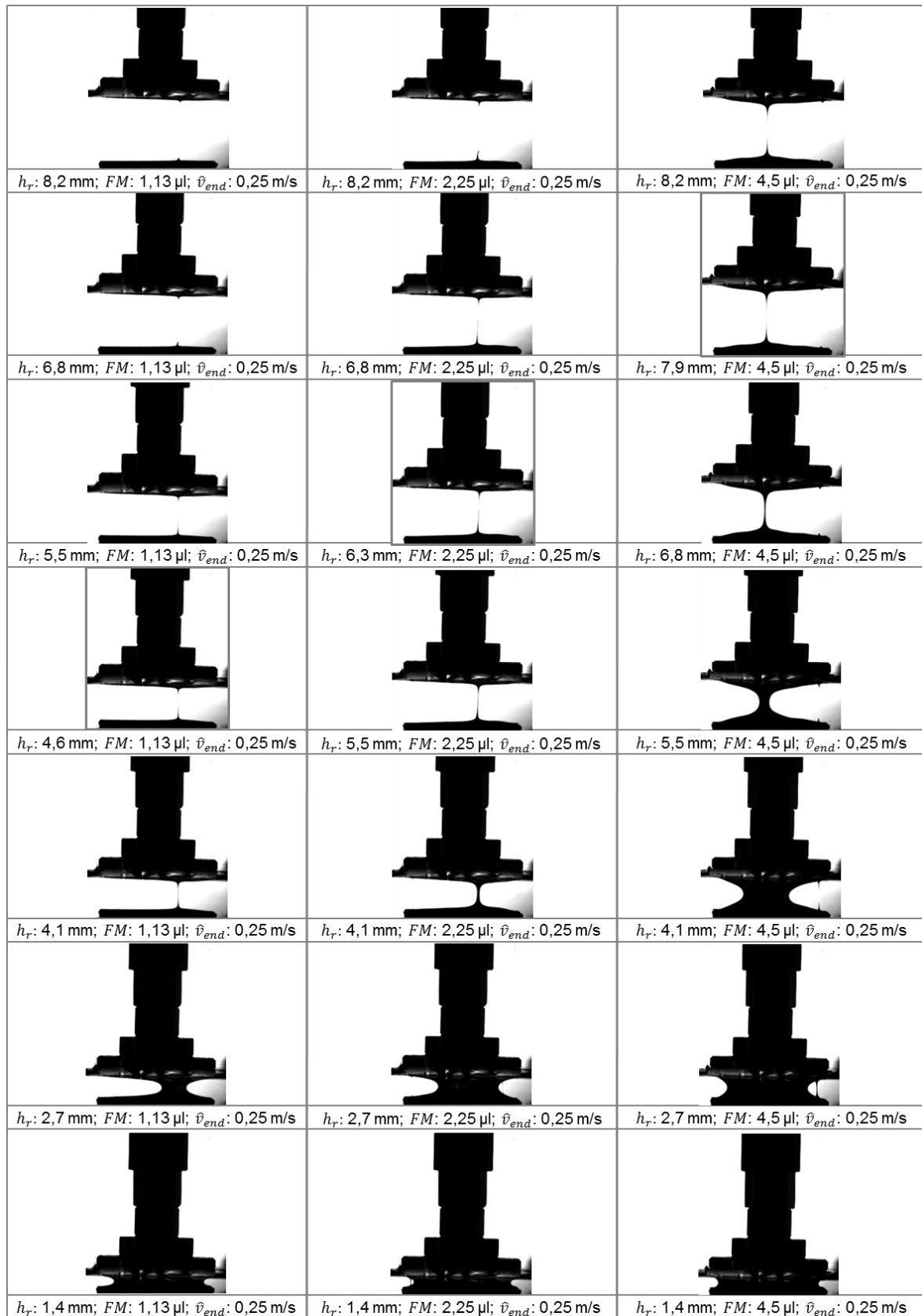


Abbildung VI_16: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,25$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μ l. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 60% (tats. Tonwert 56,53%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

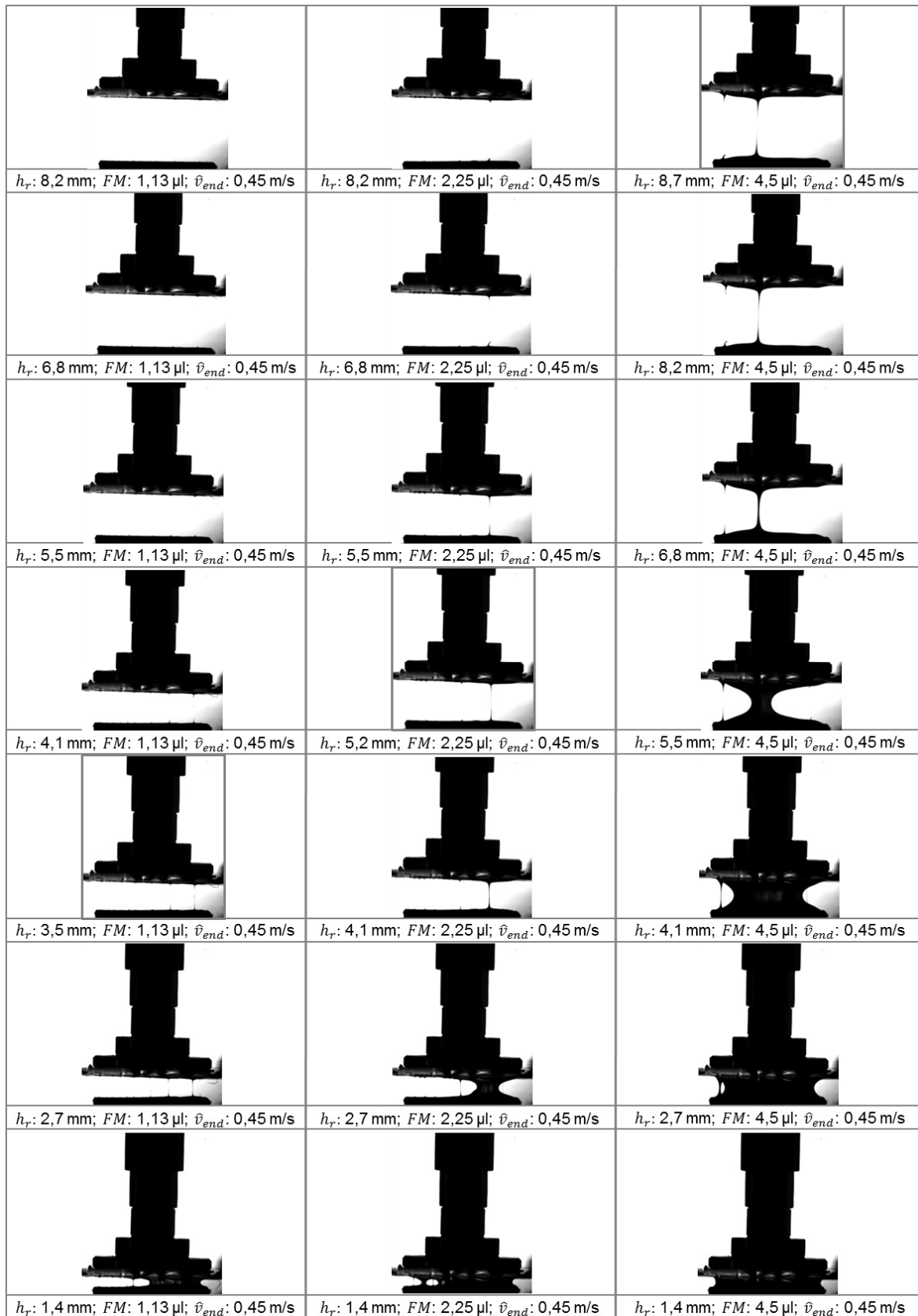


Abbildung VI_17: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,45 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μl . Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 60% (tats. Tonwert 56,53%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

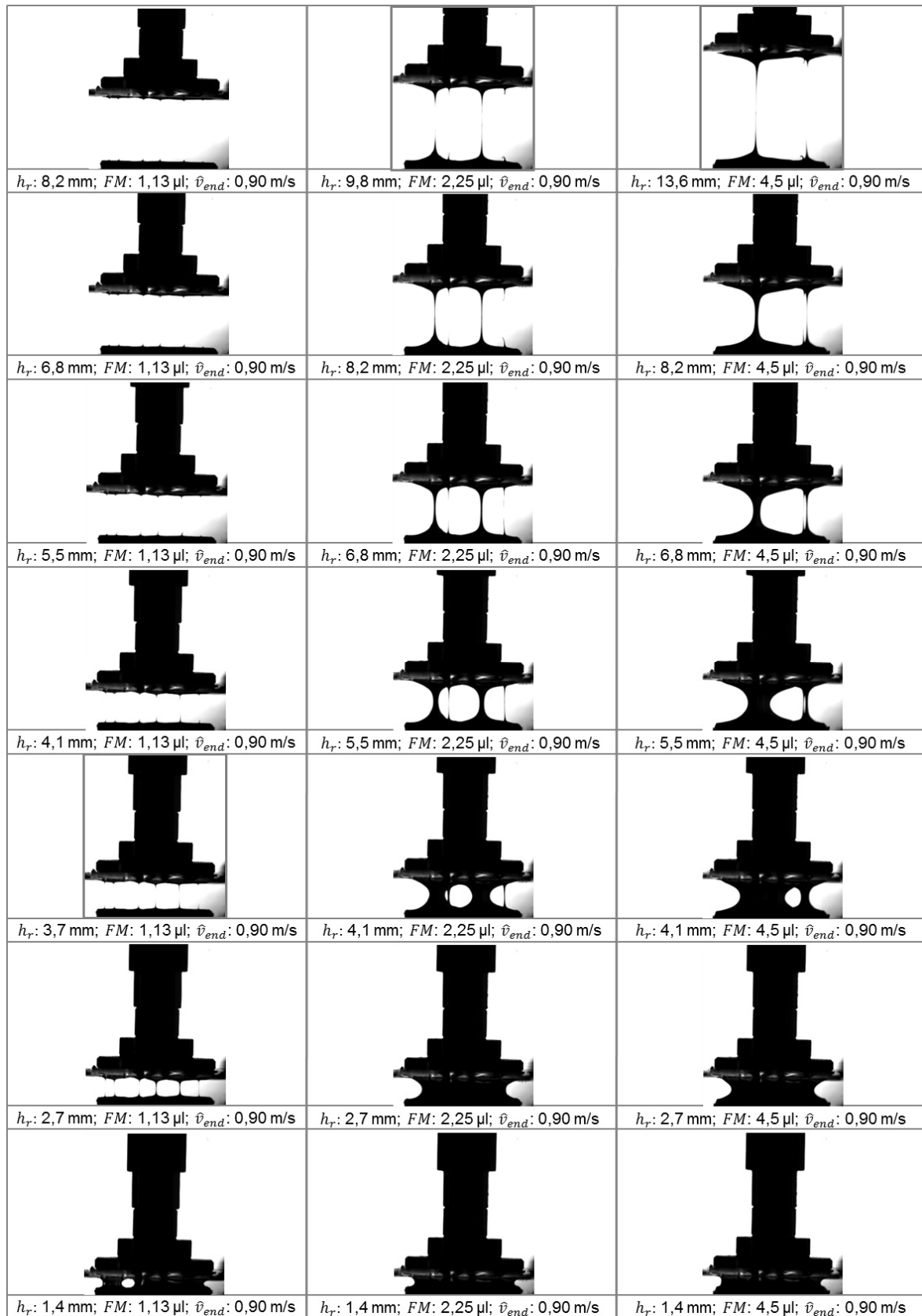


Abbildung VI_18: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,90 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von 1,13; 2,25 und 3,5 μl . Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 60% (tats. Tonwert 56,53%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

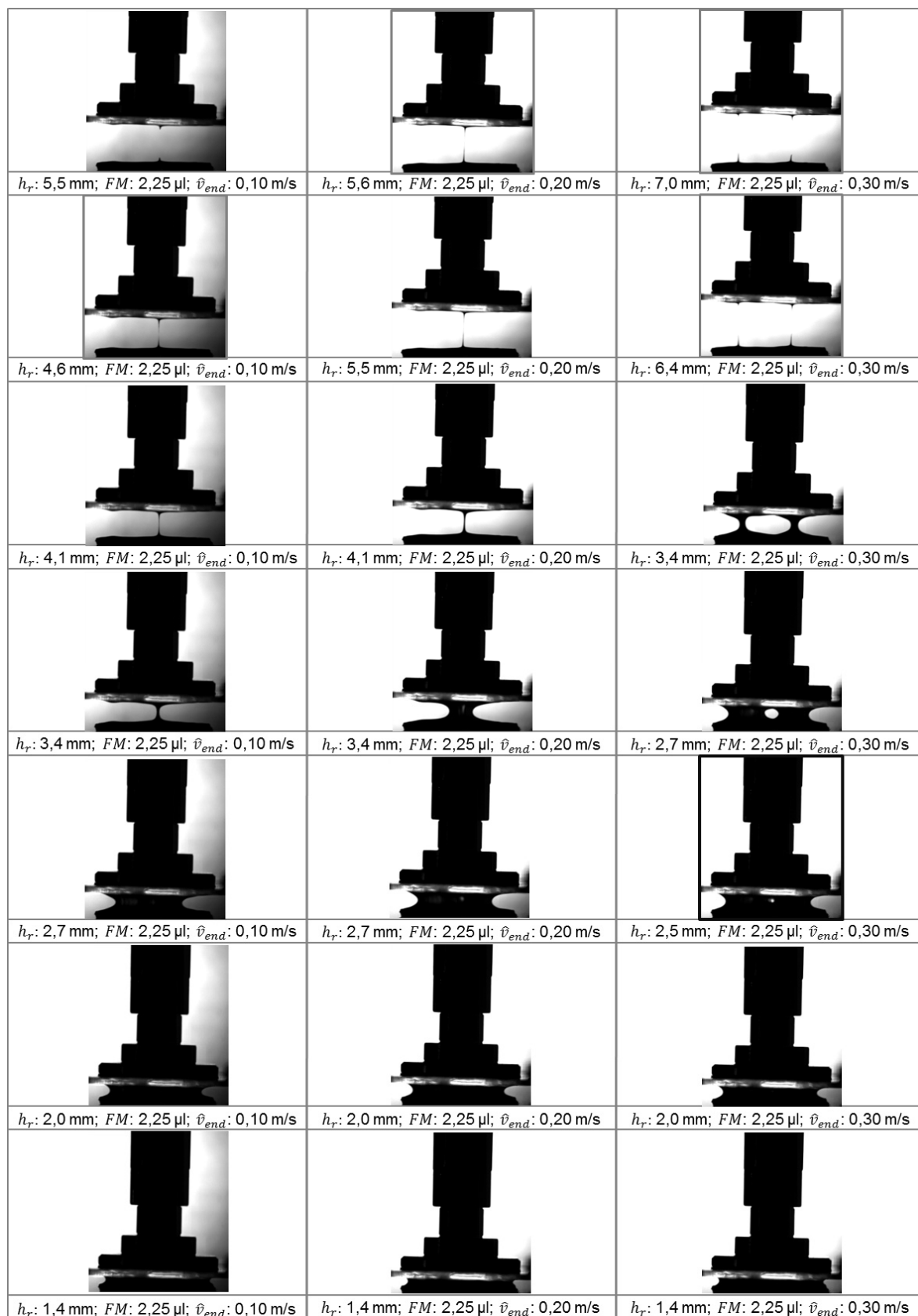


Abbildung V2_01: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,10; 0,20$ und $0,30 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 100% (tats. Tonwert 100%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

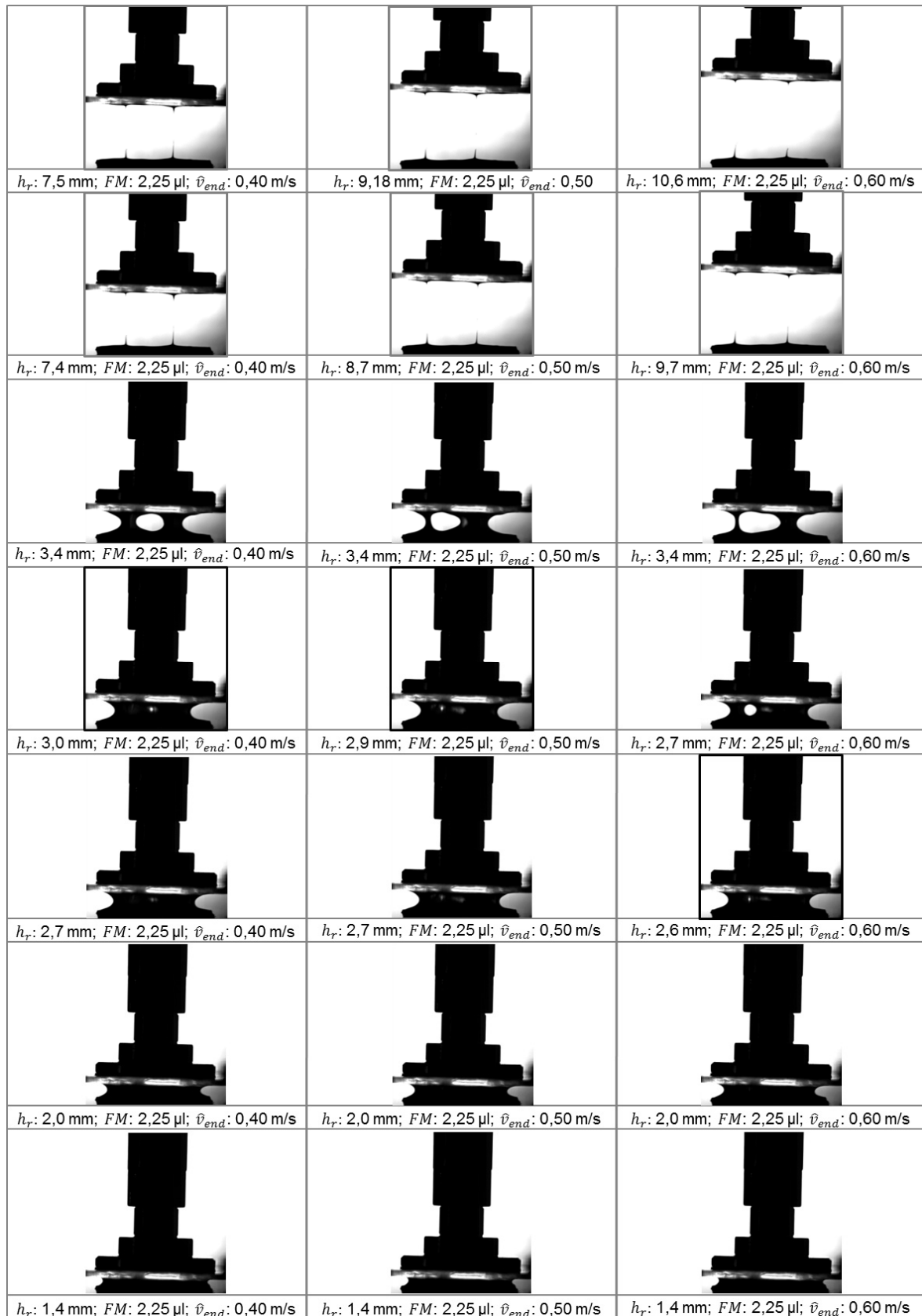


Abbildung V2_02: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,40$; $0,50$ und $0,60 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 100% (tats. Tonwert 100%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

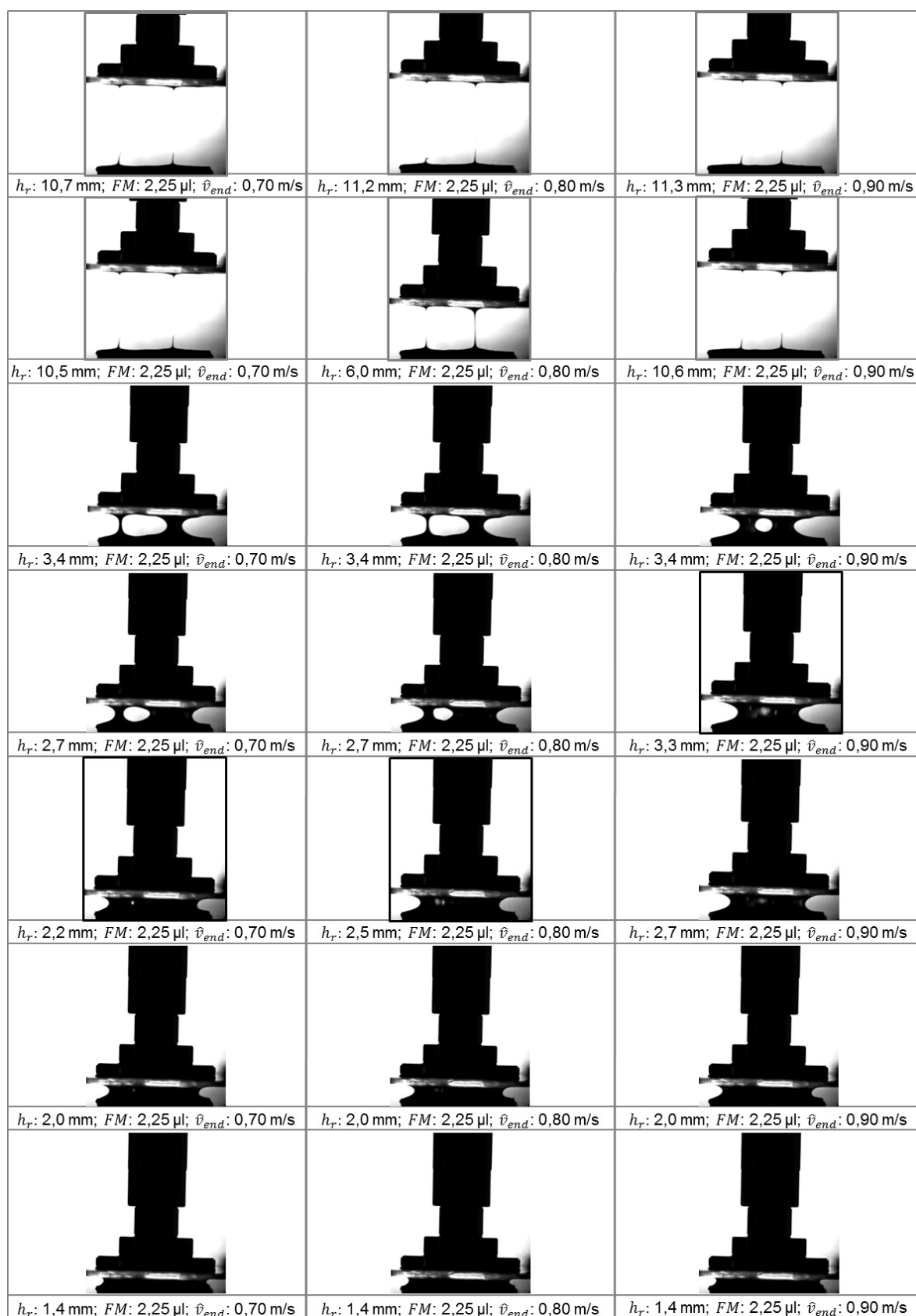


Abbildung V2_03: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,70$; $0,80$ und $0,90$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 100% (tats. Tonwert 100%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

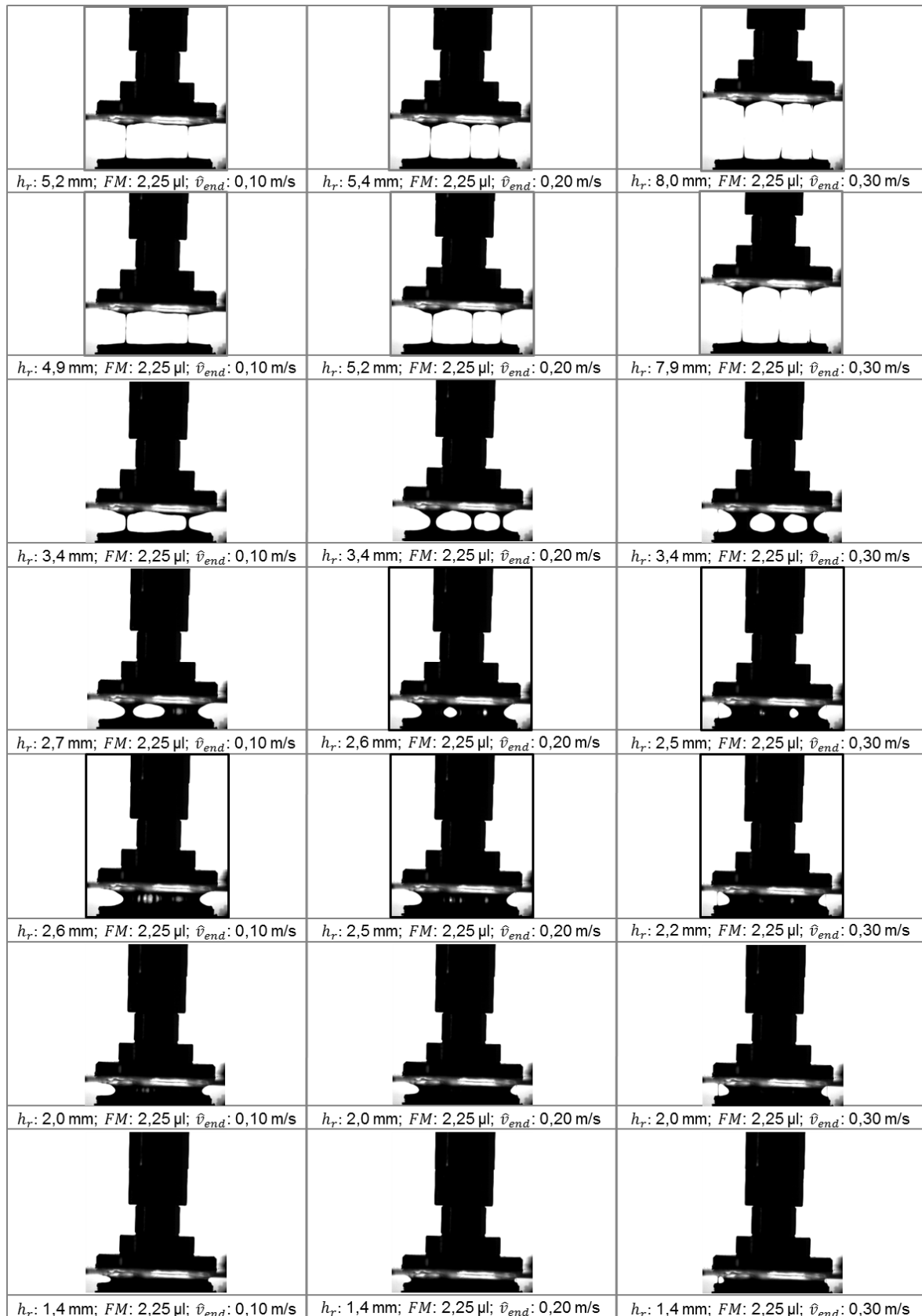


Abbildung V2_04: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,10$; $0,20$ und $0,30 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 70% (tats. Tonwert 64,58%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

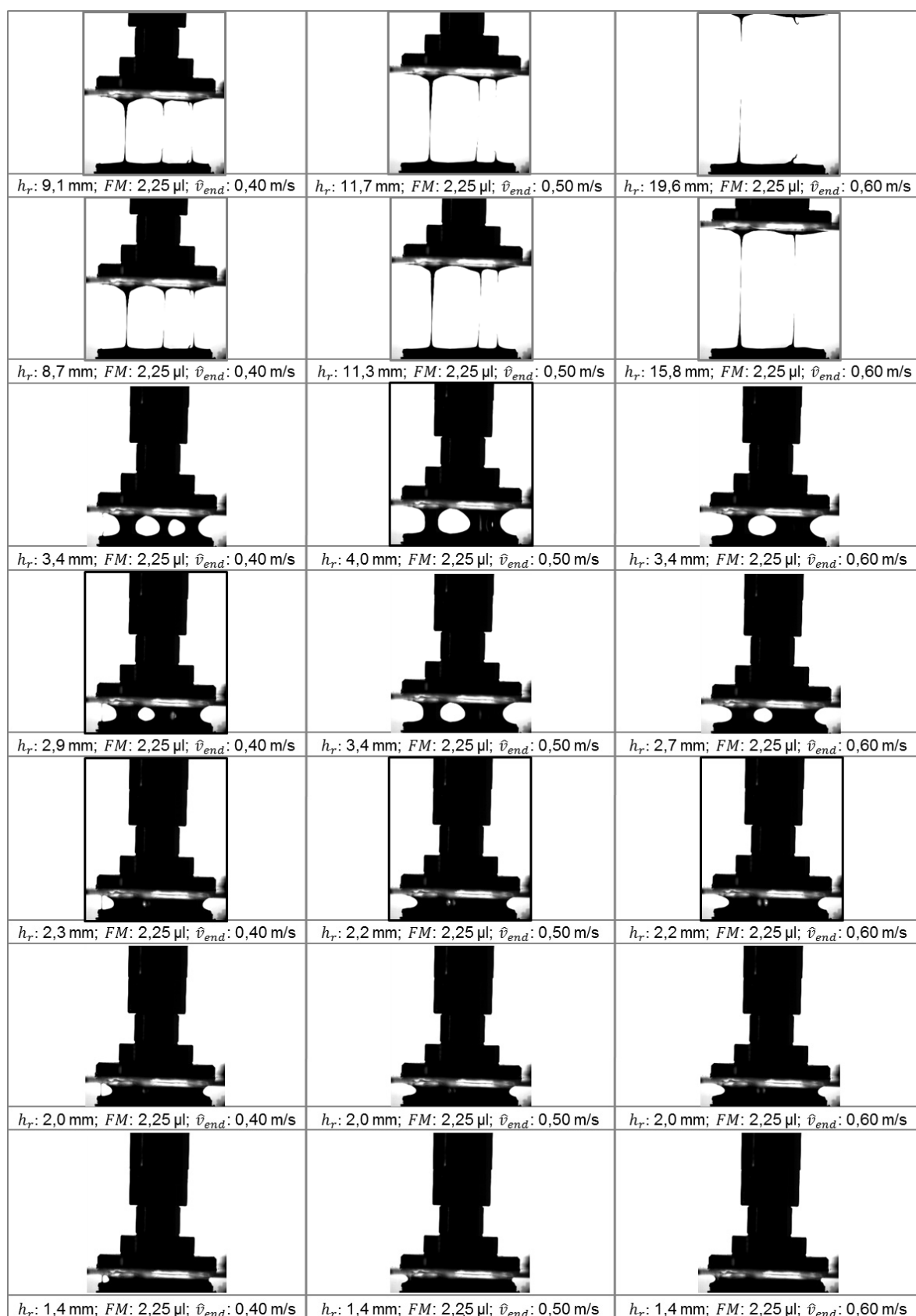


Abbildung V2_05: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,40$; $0,50$ und $0,60$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 70% (tats. Tonwert 64,58%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

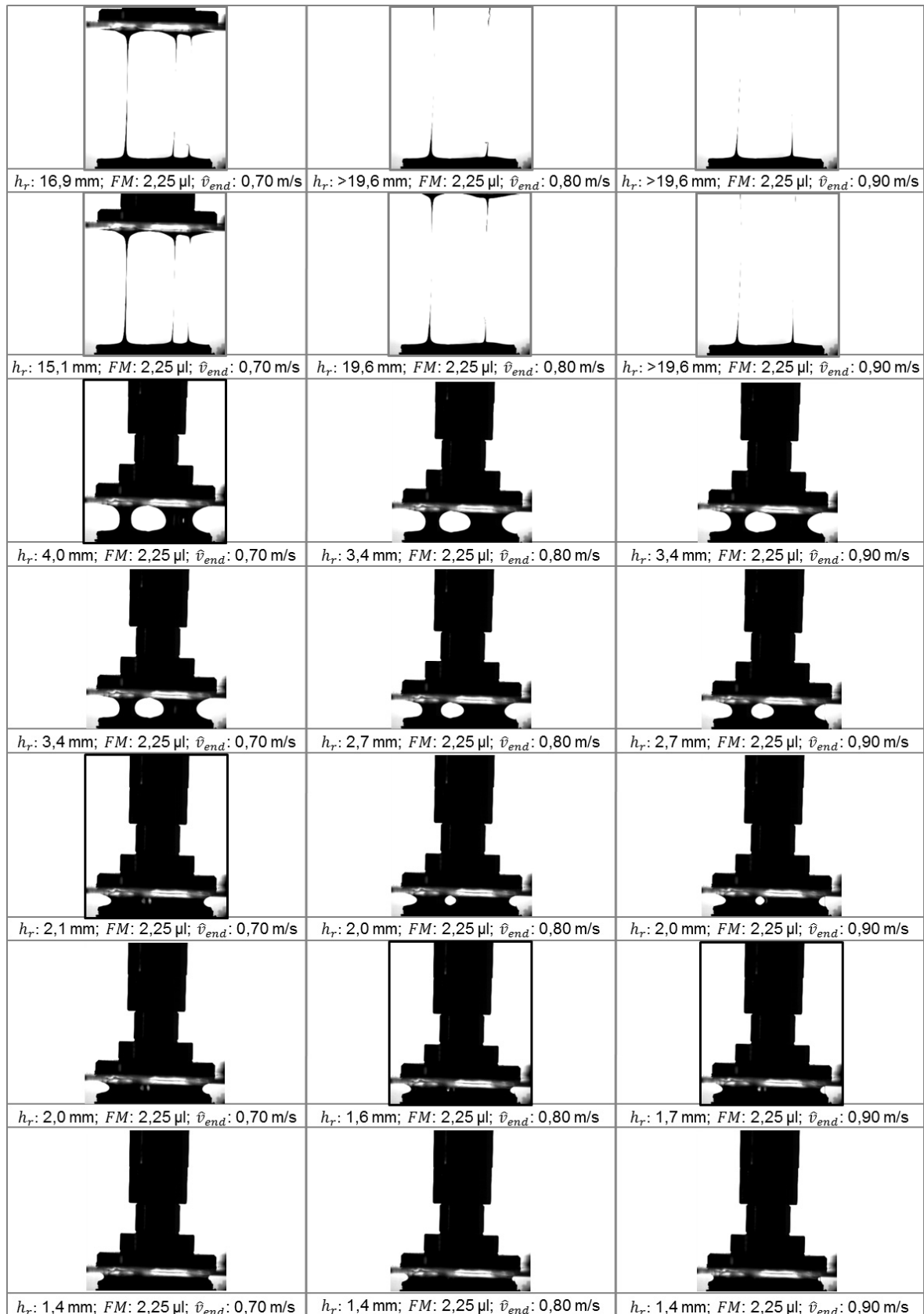


Abbildung V2_06: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,70; 0,80$ und $0,90 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 70% (tats. Tonwert 64,58%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

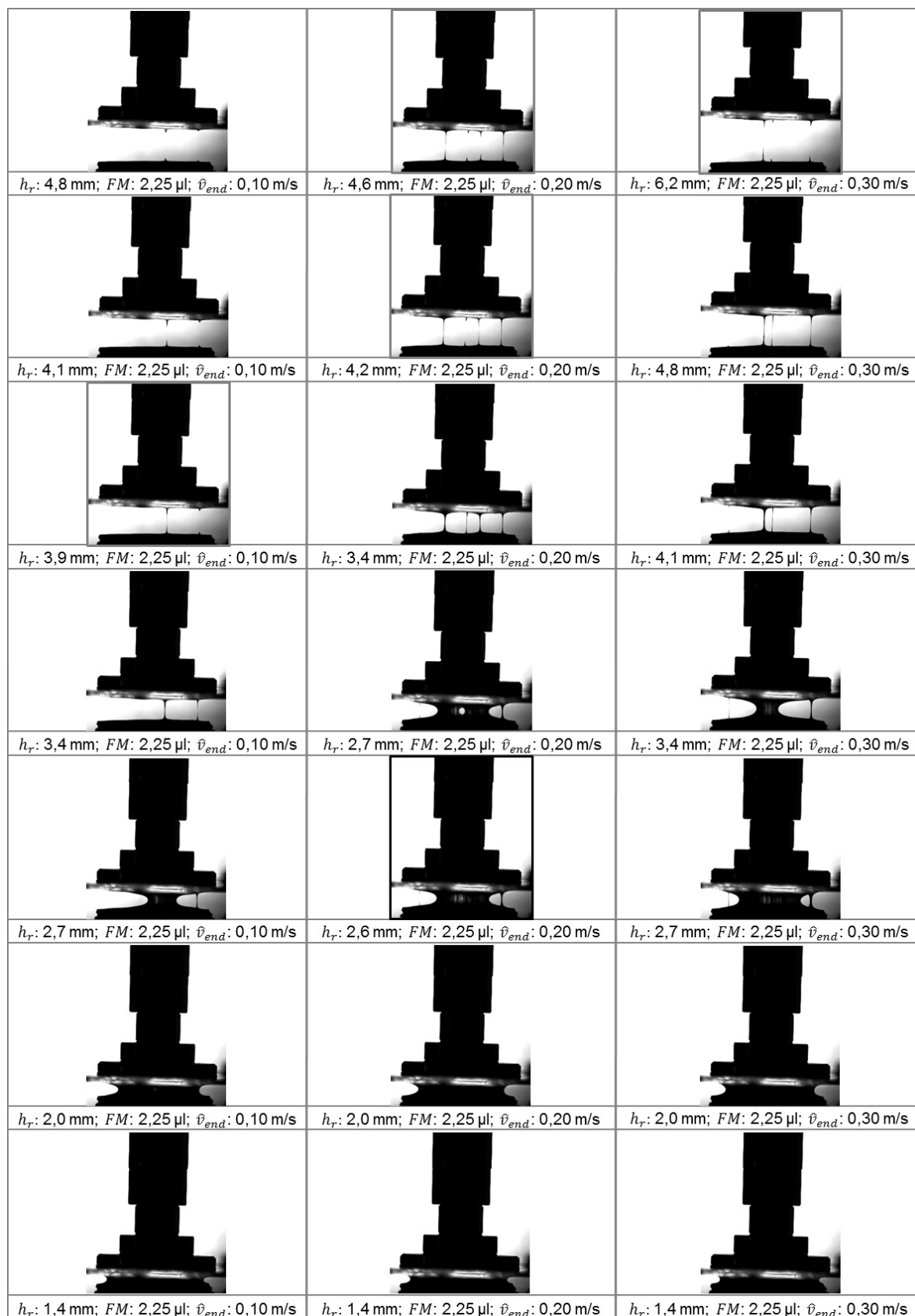


Abbildung V2_07: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,10$; $0,20$ und $0,30$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 40% (tats. Tonwert 37,65%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

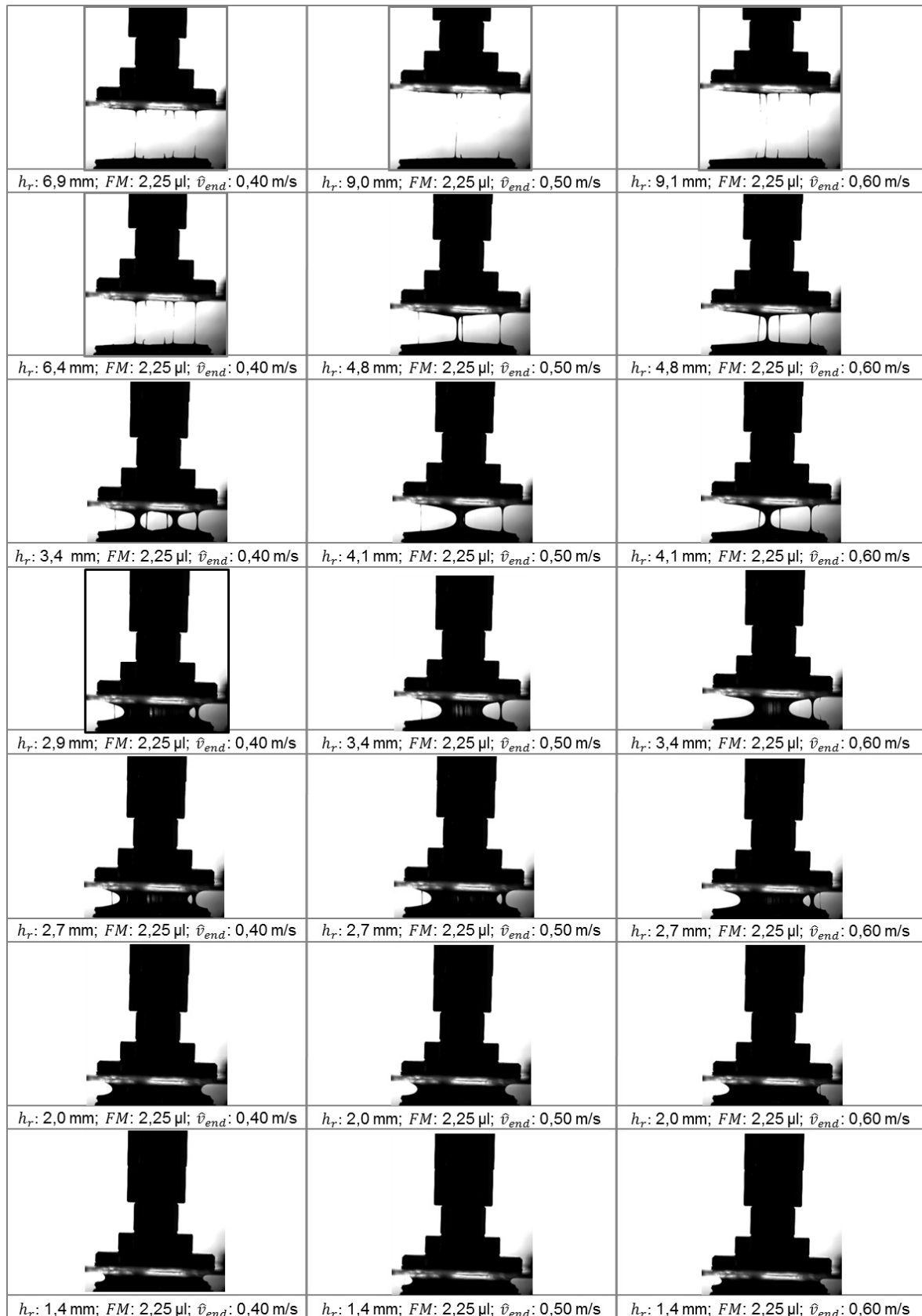


Abbildung V2_08: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,40$; $0,50$ und $0,60 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 40% (tats. Tonwert 37,65%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

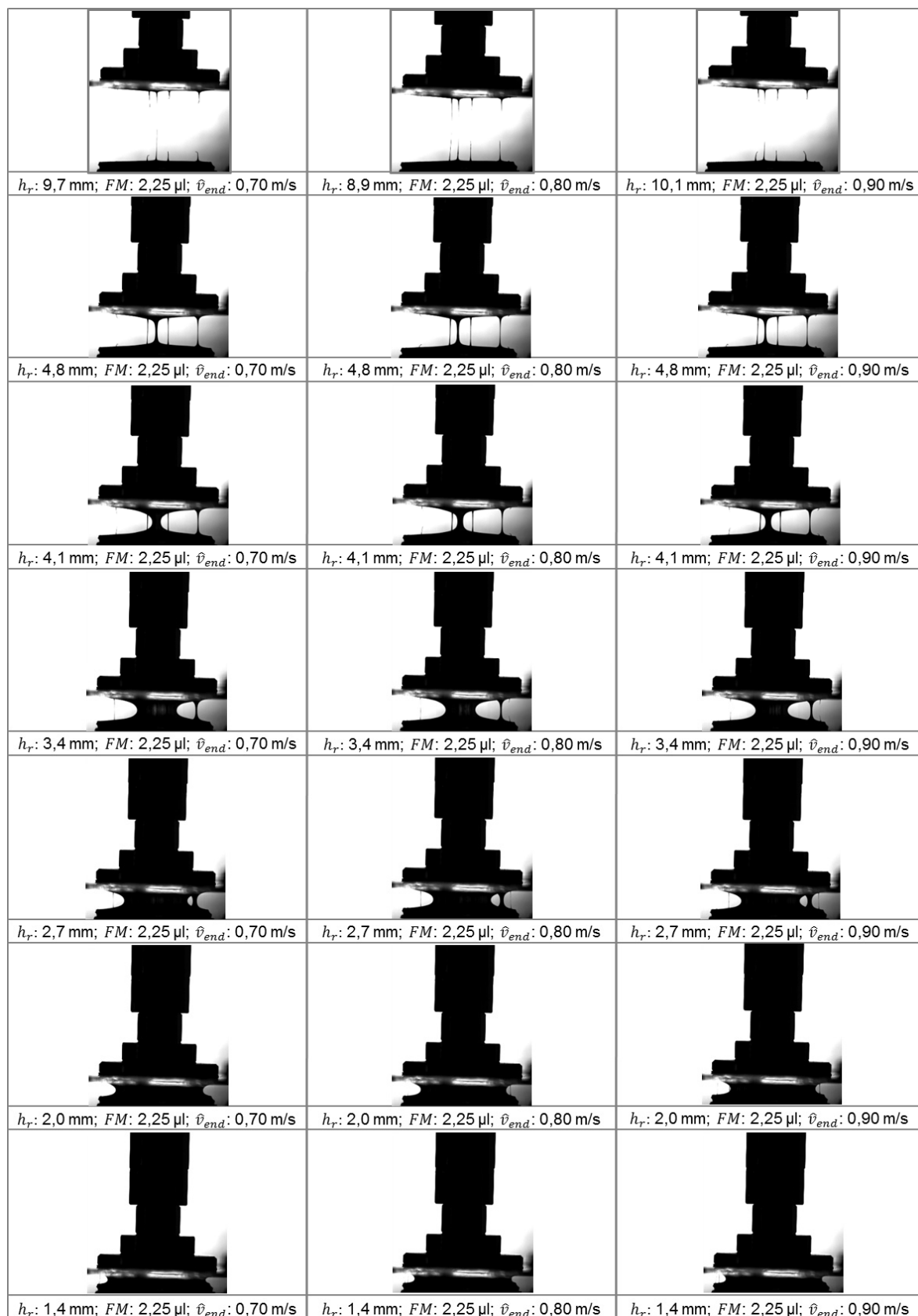


Abbildung V2_09: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,70; 0,80$ und $0,90 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 40% (tats. Tonwert 37,65%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

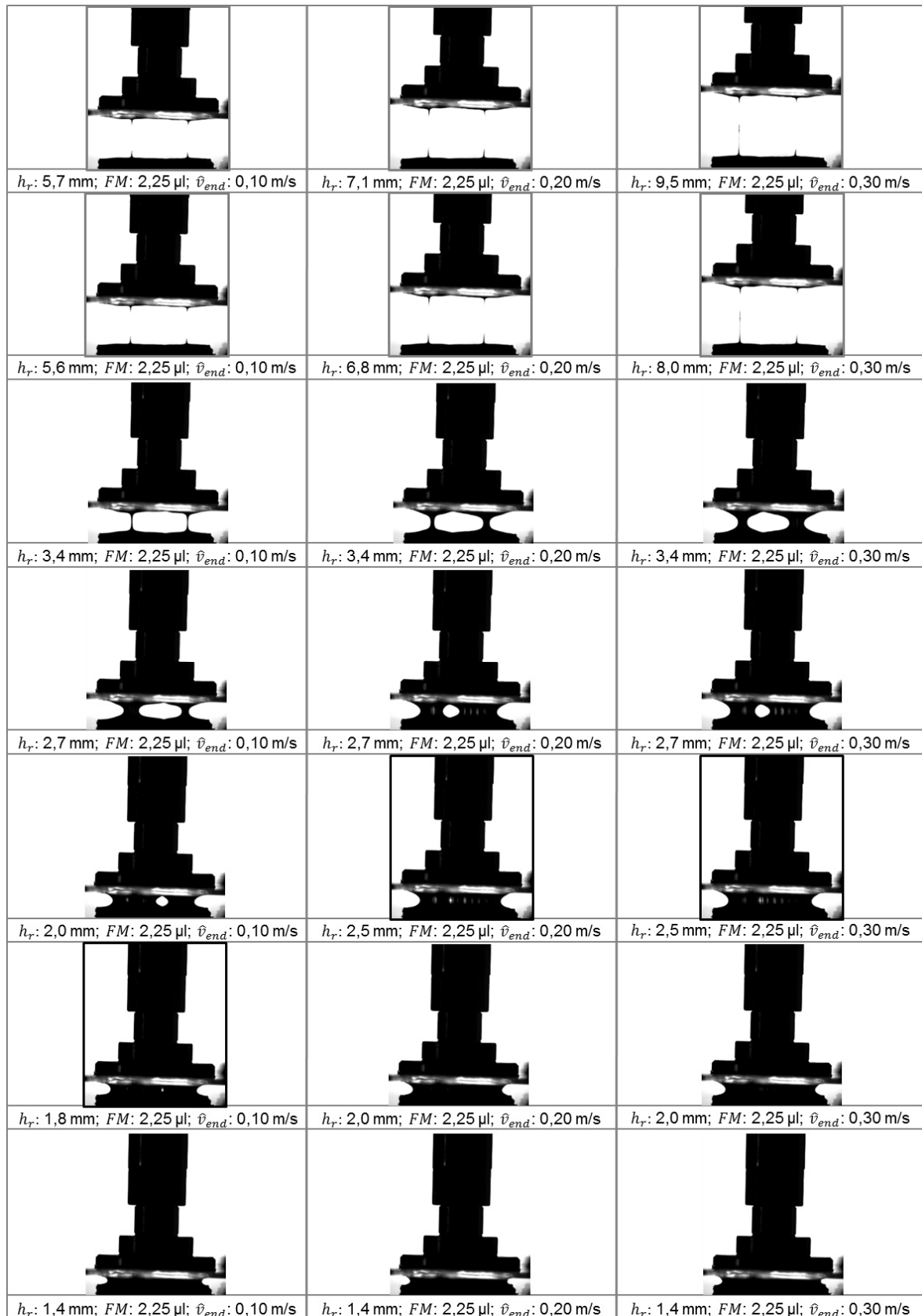


Abbildung V2_10: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,10; 0,20$ und $0,30 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 10% (tats. Tonwert 2,23%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

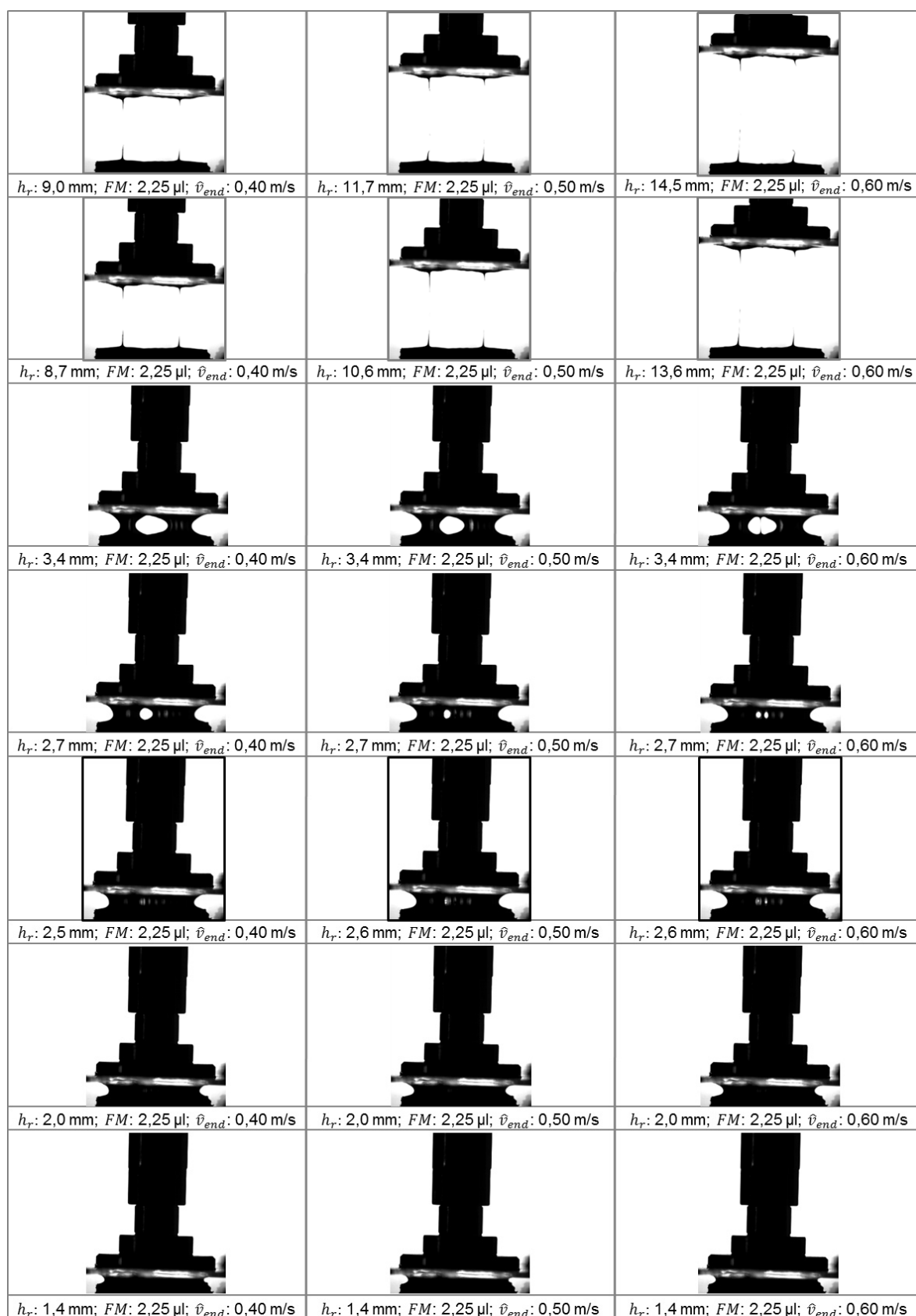


Abbildung V2_11: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,40; 0,50$ und $0,60 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \text{ }\mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 10% (tats. Tonwert 2,23%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

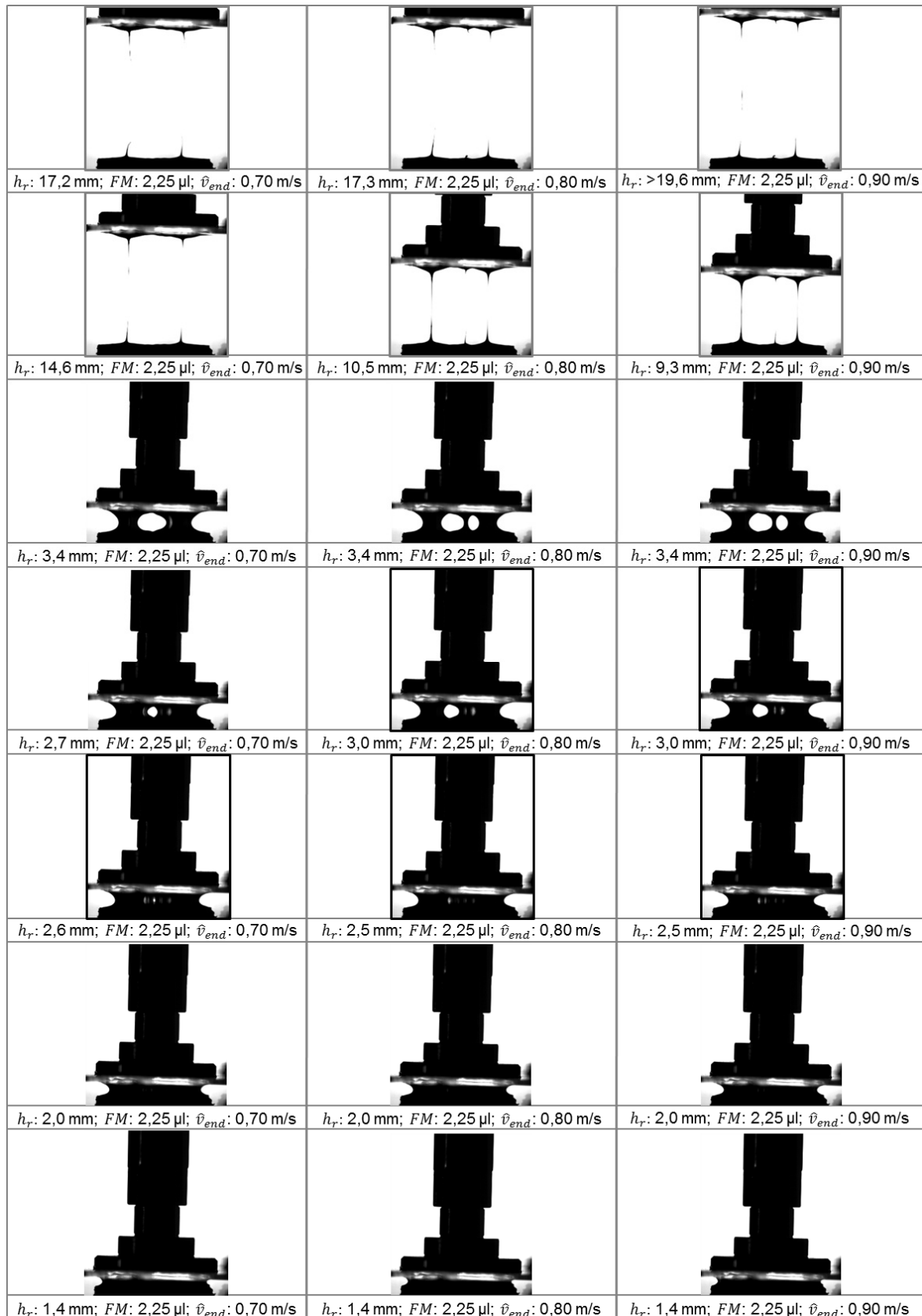


Abbildung V2_12: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,70$; $0,80$ und $0,90$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 10% (tats. Tonwert 2,23%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.






















		
h_r : 3,4 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 3,5 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 4,7 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s
		
h_r : 2,7 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 2,7 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 2,7 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s
		
h_r : 2,3 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 2,2 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 2,3 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s
		
h_r : 2,2 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 1,6 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 2,2 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s
		
h_r : 1,6 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 1,4 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 2,1 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s
		
h_r : 1,5 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 1,3 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 1,6 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s
		
h_r : 1,1 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 1,1 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 1,1 mm; FM: 2,25 µl; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s

Abbildung V3_01: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,10$; $0,20$ und $0,30$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 45,85%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

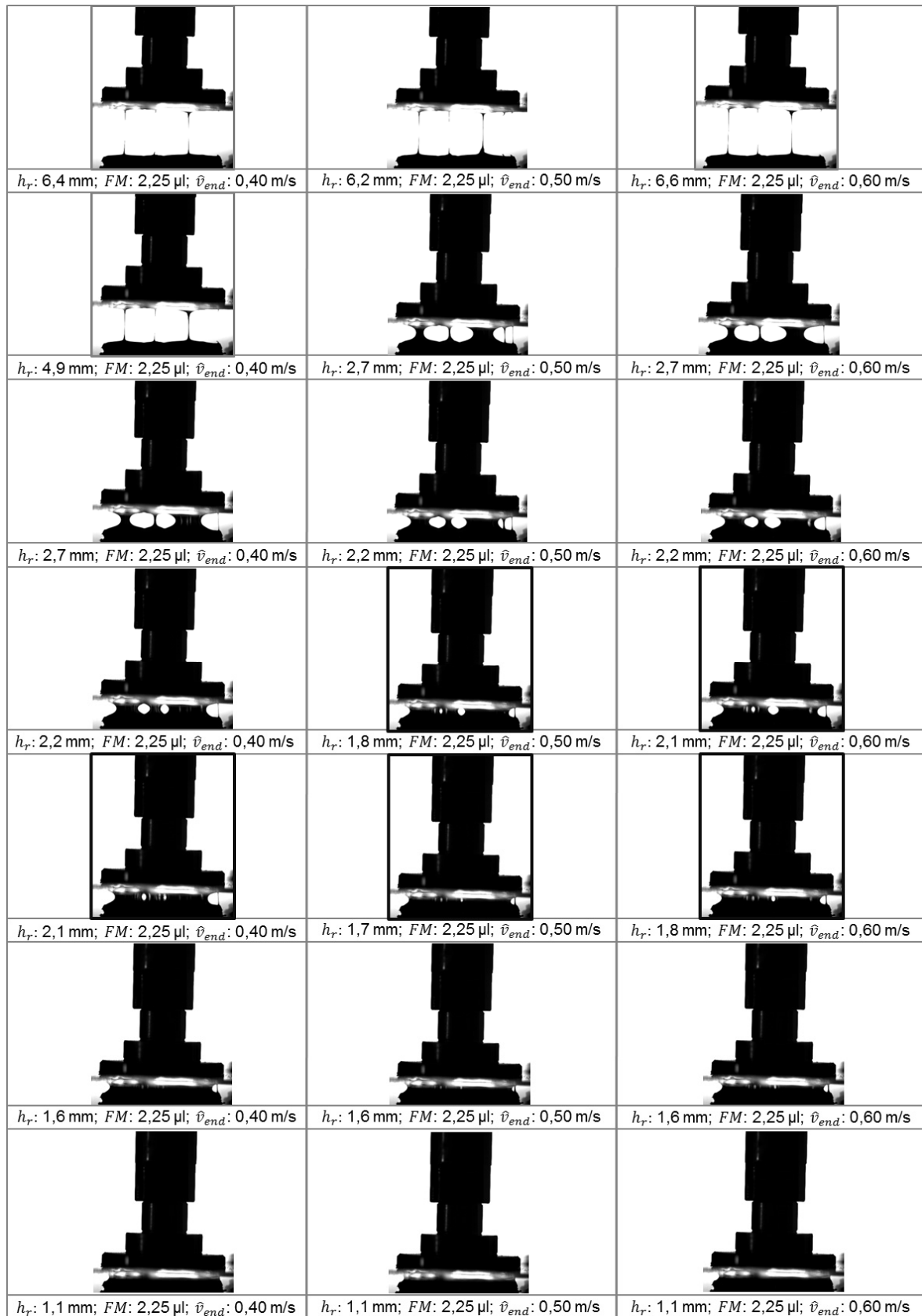


Abbildung V3_02: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,40$; $0,50$ und $0,60$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 45,85%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

$h_r: 7,5 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,70 \text{ m/s}$	$h_r: 7,0 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,80 \text{ m/s}$	$h_r: 6,6 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,90 \text{ m/s}$
$h_r: 2,7 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,70 \text{ m/s}$	$h_r: 2,7 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,80 \text{ m/s}$	$h_r: 2,7 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,90 \text{ m/s}$
$h_r: 2,2 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,70 \text{ m/s}$	$h_r: 2,2 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,80 \text{ m/s}$	$h_r: 2,2 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,90 \text{ m/s}$
$h_r: 2,1 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,70 \text{ m/s}$	$h_r: 1,8 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,80 \text{ m/s}$	$h_r: 2,0 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,90 \text{ m/s}$
$h_r: 1,8 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,70 \text{ m/s}$	$h_r: 1,7 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,80 \text{ m/s}$	$h_r: 1,8 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,90 \text{ m/s}$
$h_r: 1,6 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,70 \text{ m/s}$	$h_r: 1,6 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,80 \text{ m/s}$	$h_r: 1,6 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,90 \text{ m/s}$
$h_r: 1,1 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,70 \text{ m/s}$	$h_r: 1,1 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,80 \text{ m/s}$	$h_r: 1,1 \text{ mm}; FM: 2,25 \text{ }\mu\text{l}; \hat{v}_{end}: 0,90 \text{ m/s}$

Abbildung V3_03: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,70; 0,80$ und $0,90 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \text{ }\mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 45,85%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

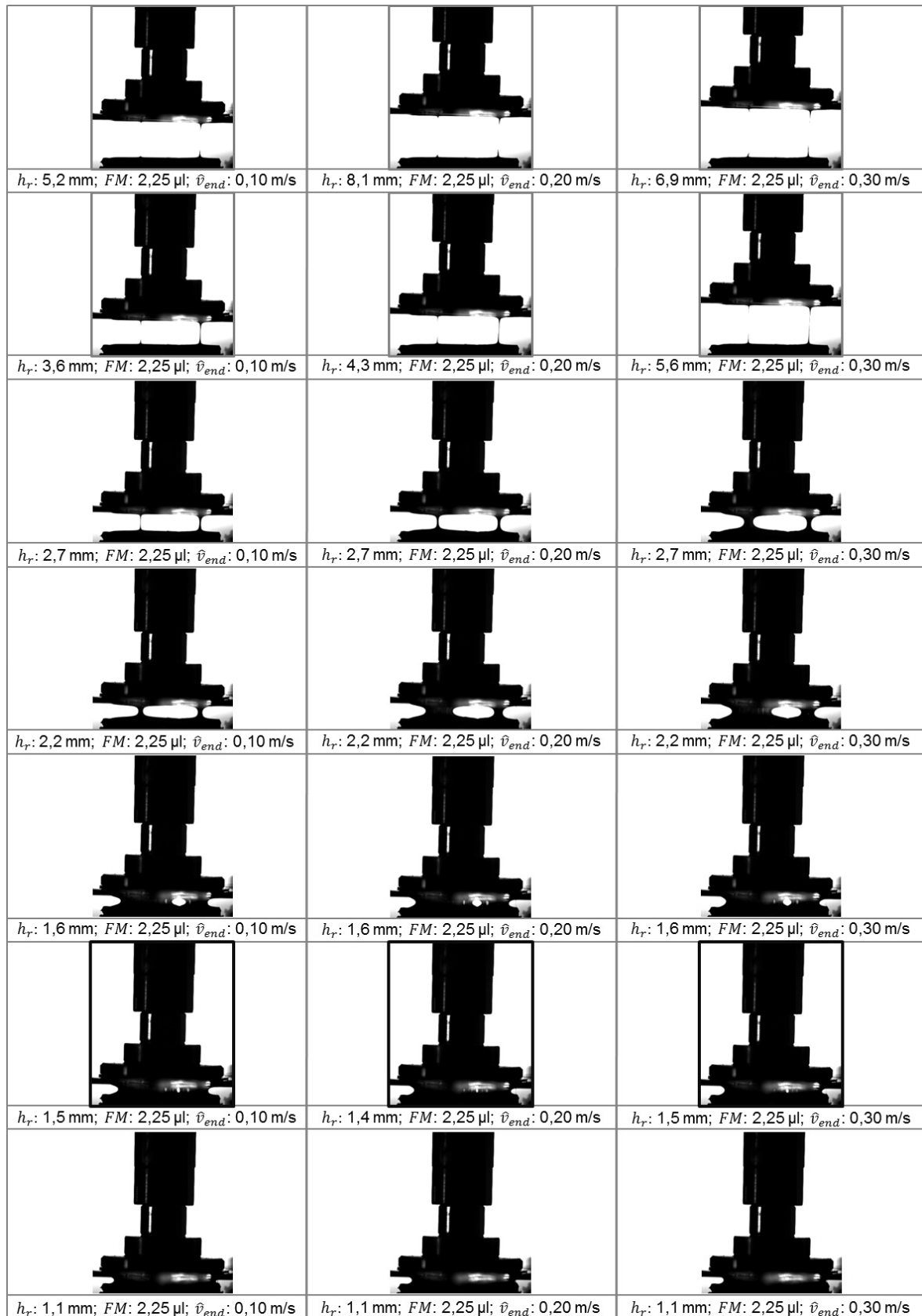


Abbildung V3_04: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,10; 0,20$ und $0,30 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von 0° bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 45,85%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.



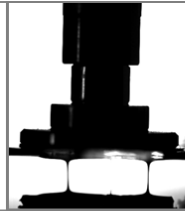


















		
h_r : 4,0 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 6,2 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 4,2 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s
		
h_r : 2,7 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 7,8 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 2,7 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s
		
h_r : 2,2 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 2,7 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 2,2 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s
		
h_r : 1,7 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 2,2 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 1,7 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s
		
h_r : 1,6 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 1,6 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 1,6 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s
		
h_r : 1,5 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 1,5 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 1,5 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s
		
h_r : 1,1 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 1,1 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 1,1 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s

Abbildung V3_05: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,40$; $0,50$ und $0,60$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von 0° bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 45,85%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

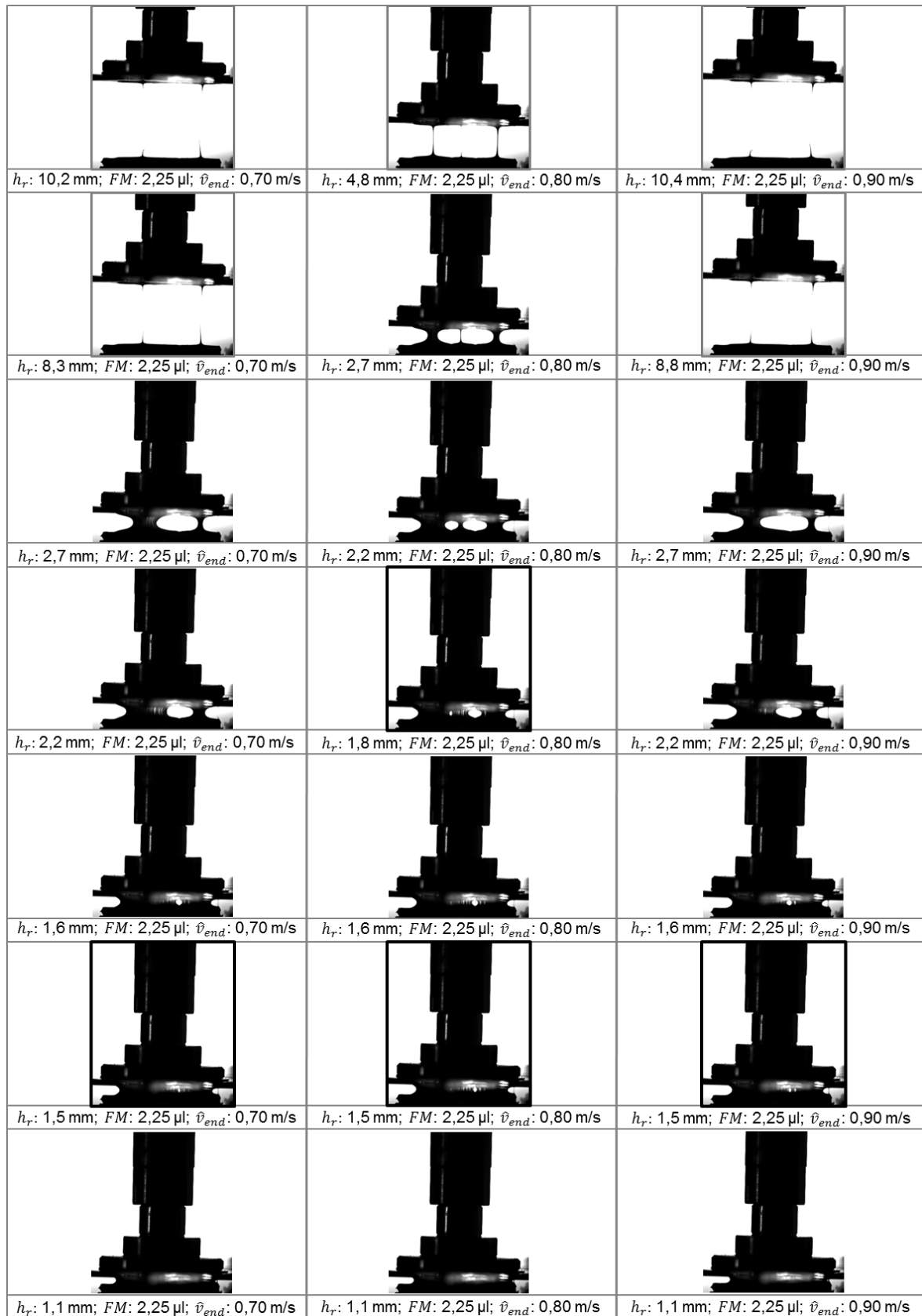


Abbildung V3_06: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,70$; $0,80$ und $0,90$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von 0° bei einer Rasterweite von 48 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 45,85%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

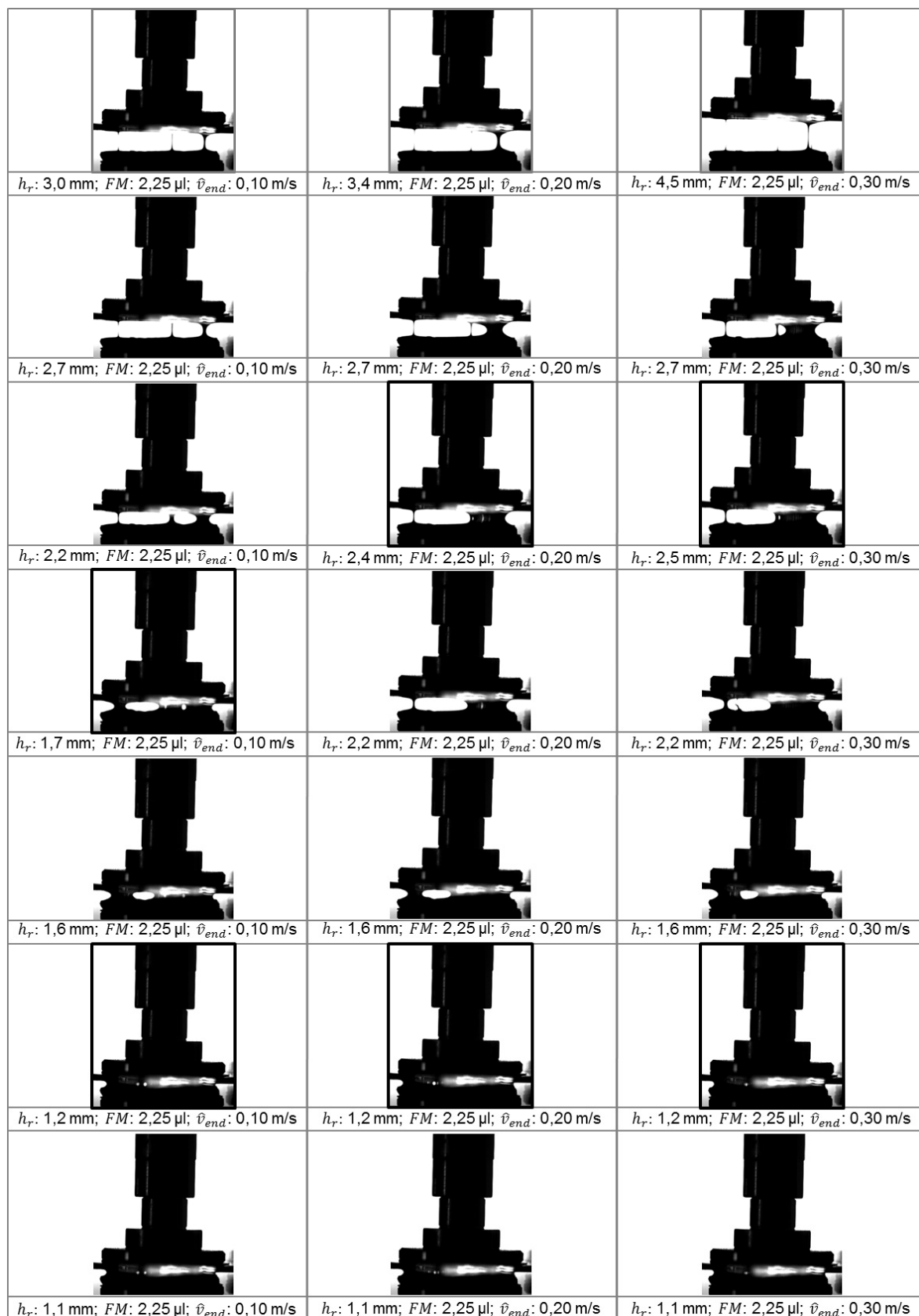


Abbildung V3_07: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,10$; $0,20$ und $0,30$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 60 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 44,63%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

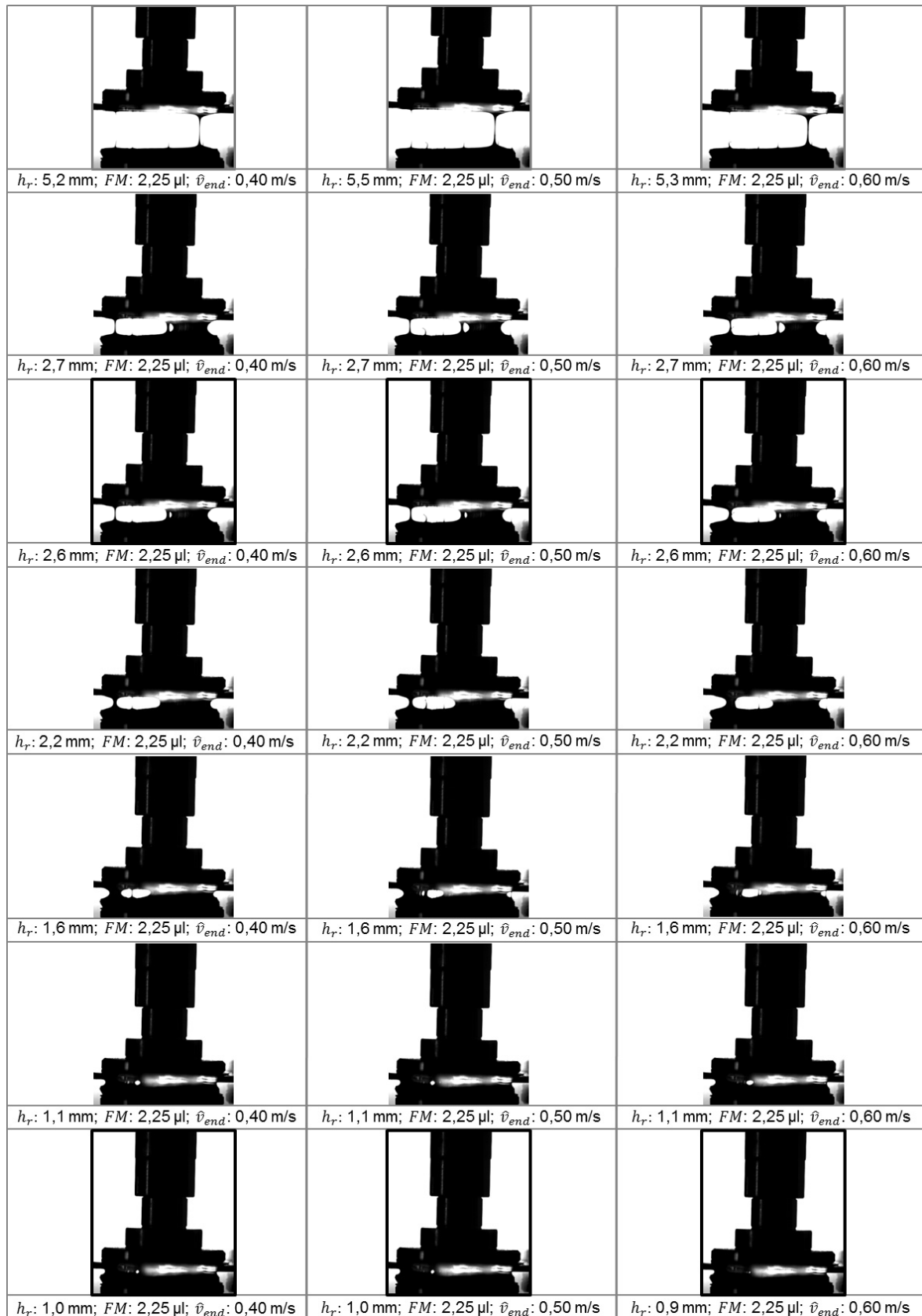


Abbildung V3_08: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,40$; $0,50$ und $0,60 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 60 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 44,63%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

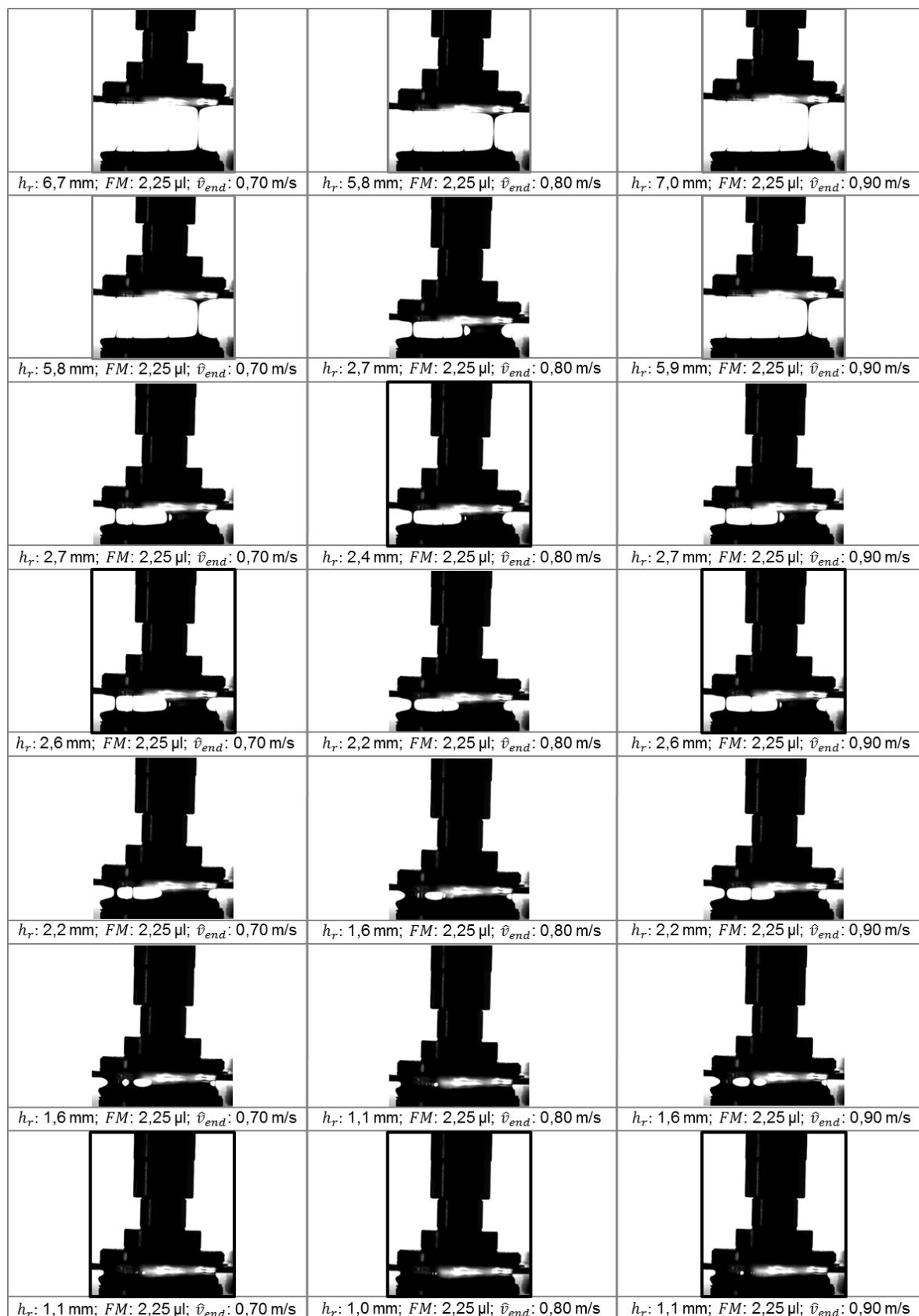


Abbildung V3_09: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,70$; $0,80$ und $0,90$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 60 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 44,63%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

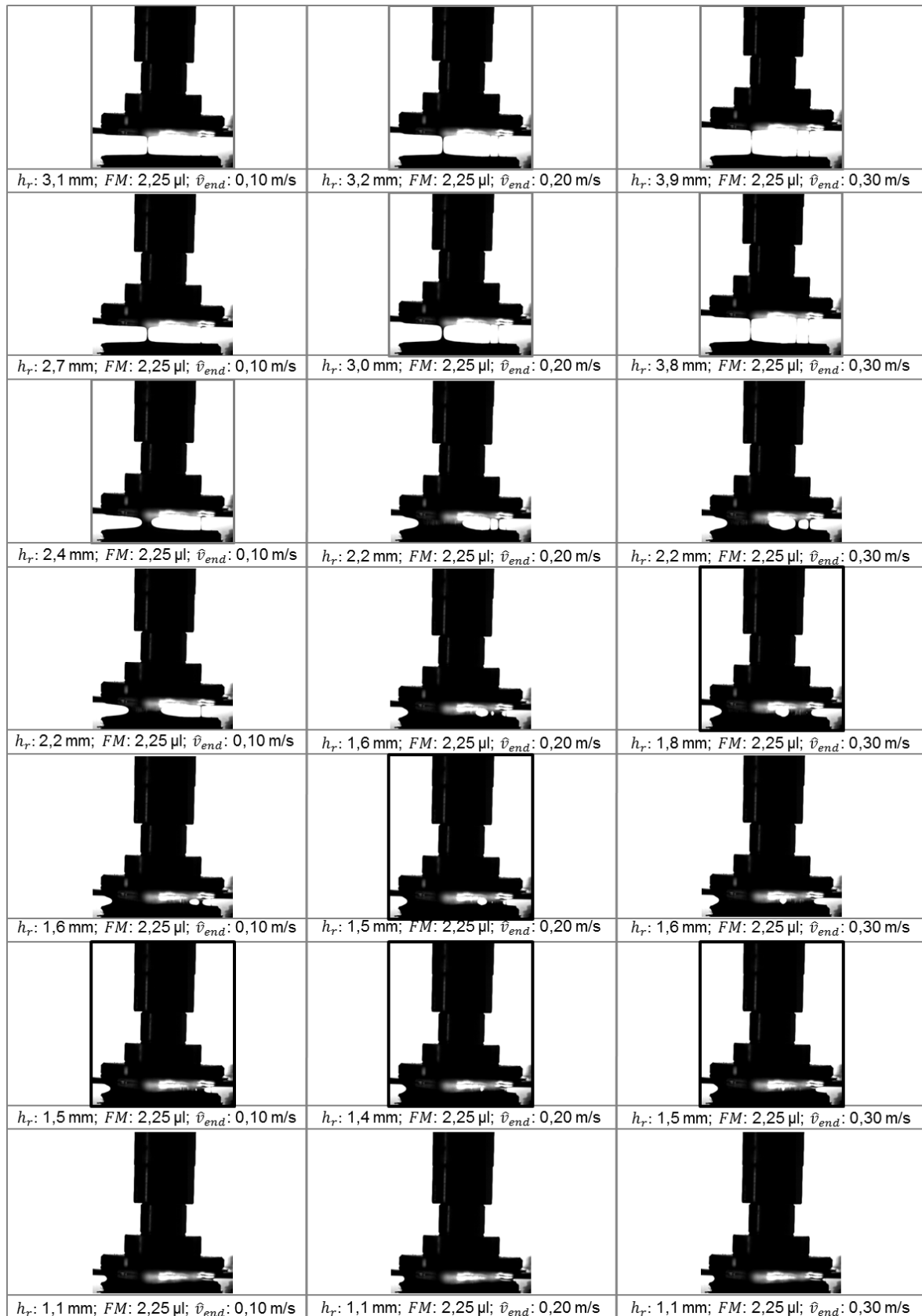


Abbildung V3_10: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,10$; $0,20$ und $0,30$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von 0° bei einer Rasterweite von 60 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 44,63%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.






















		
h_r : 4,7 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 5,0 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 3,9 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s
		
h_r : 4,1 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 4,3 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 2,2 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s
		
h_r : 2,2 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 2,2 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 1,8 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s
		
h_r : 2,0 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 1,8 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 1,7 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s
		
h_r : 1,7 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 1,6 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 1,6 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s
		
h_r : 1,6 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 1,5 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 1,4 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s
		
h_r : 1,1 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,40 m/s	h_r : 1,1 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,50 m/s	h_r : 1,1 mm; FM: 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,60 m/s

Abbildung V3_11: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,40$; $0,50$ und $0,60$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von 0° bei einer Rasterweite von 60 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 44,63%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.

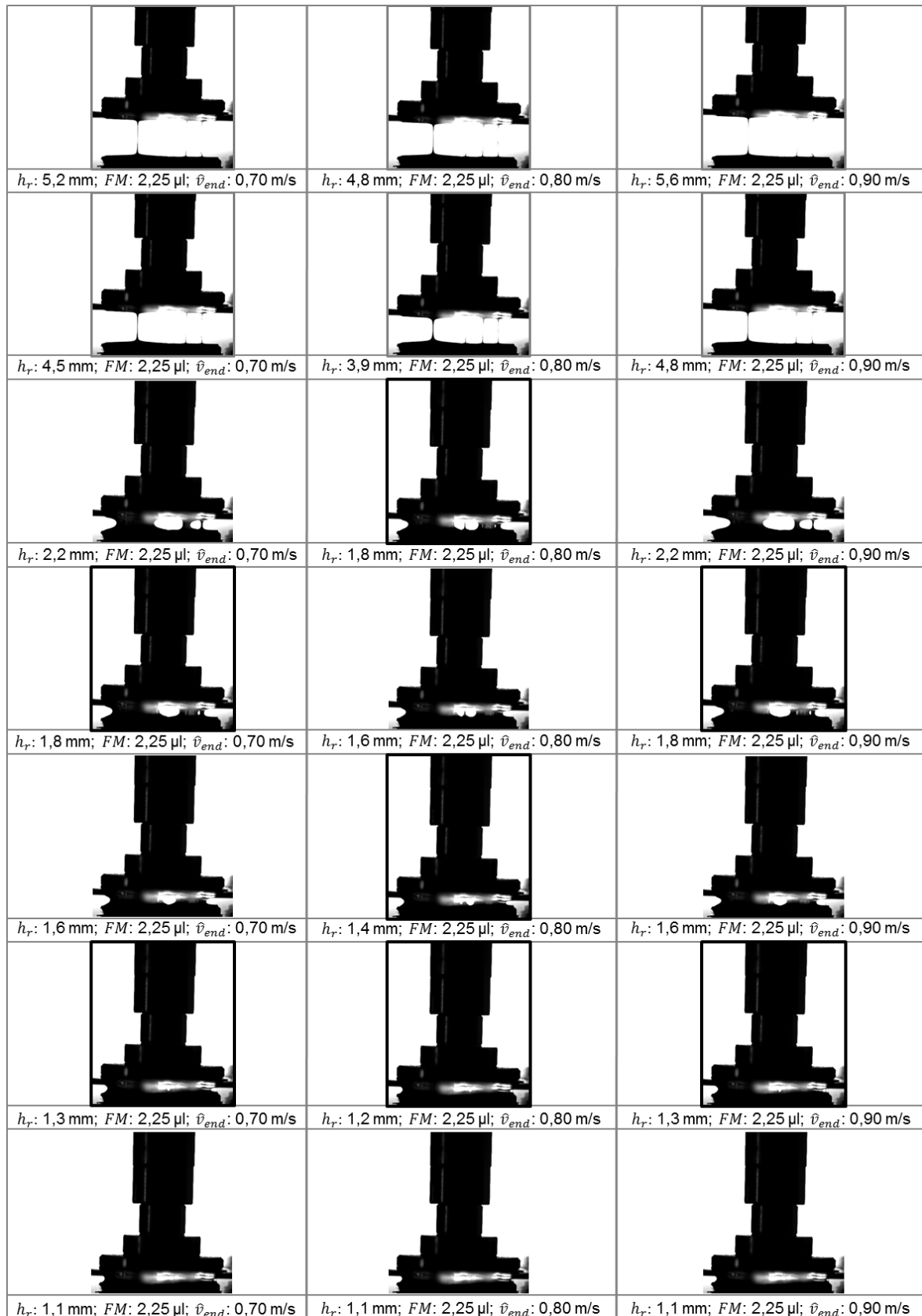


Abbildung V3_12: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,70$; $0,80$ und $0,90 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von 0° bei einer Rasterweite von 60 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert $44,63\%$). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 36-2.






















		
h_r : 5,1 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 6,6 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 5,7 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s
		
h_r : 3,8 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 3,8 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 3,8 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s
		
h_r : 3,2 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 3,2 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 3,2 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s
		
h_r : 2,7 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 2,7 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 2,7 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s
		
h_r : 2,2 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 2,2 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 2,2 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s
		
h_r : 1,6 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 1,6 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 1,6 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s
		
h_r : 1,1 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,10 m/s	h_r : 1,1 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,20 m/s	h_r : 1,1 mm; FM : 2,25 μ l; \hat{v}_{end} : 0,30 m/s

Abbildung V3_13: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,10$; $0,20$ und $0,30$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 60 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 45,85%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 39-6.

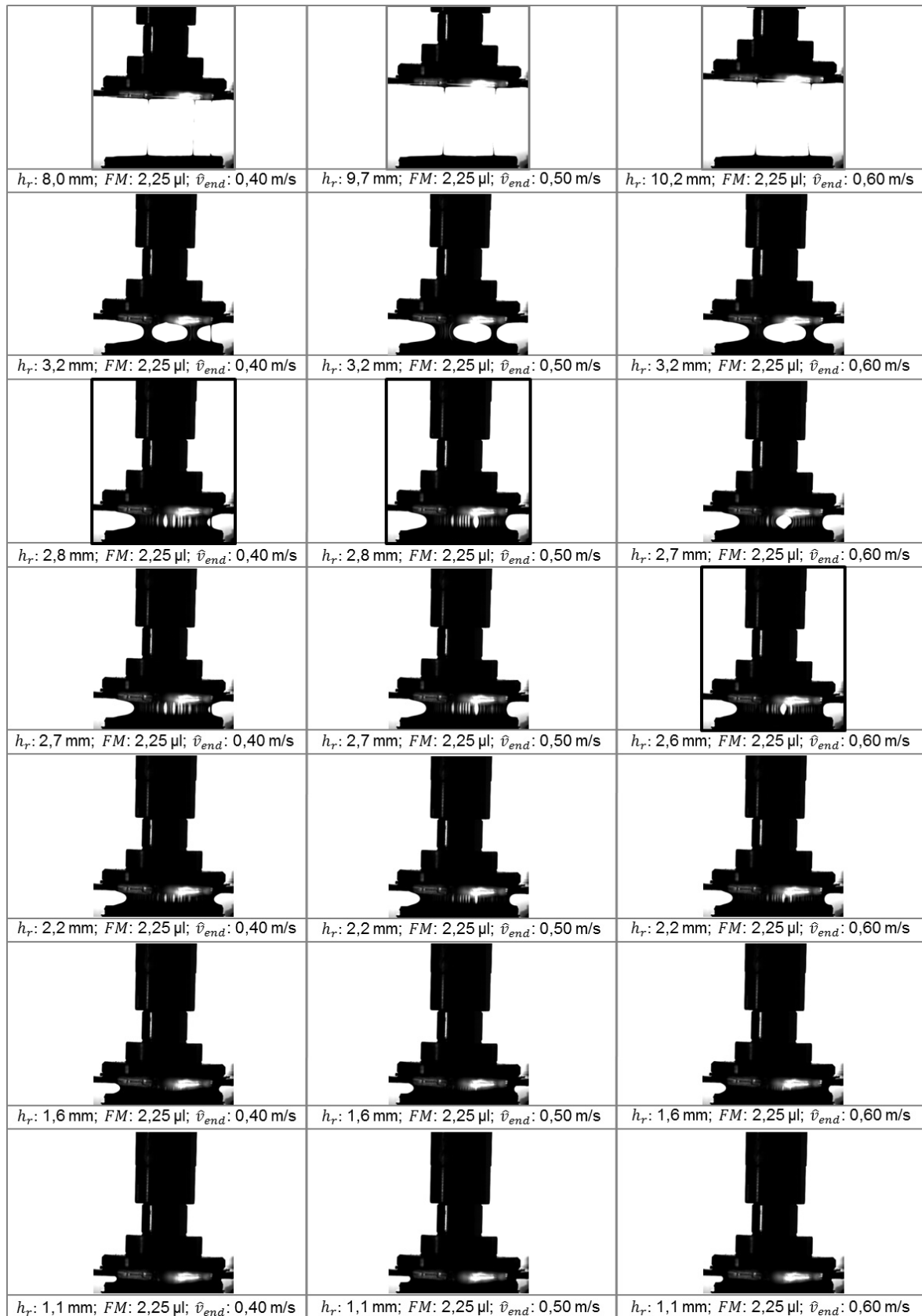


Abbildung V3_14: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,40$; $0,50$ und $0,60 \text{ m/s}$, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 60 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 45,85%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 39-6.

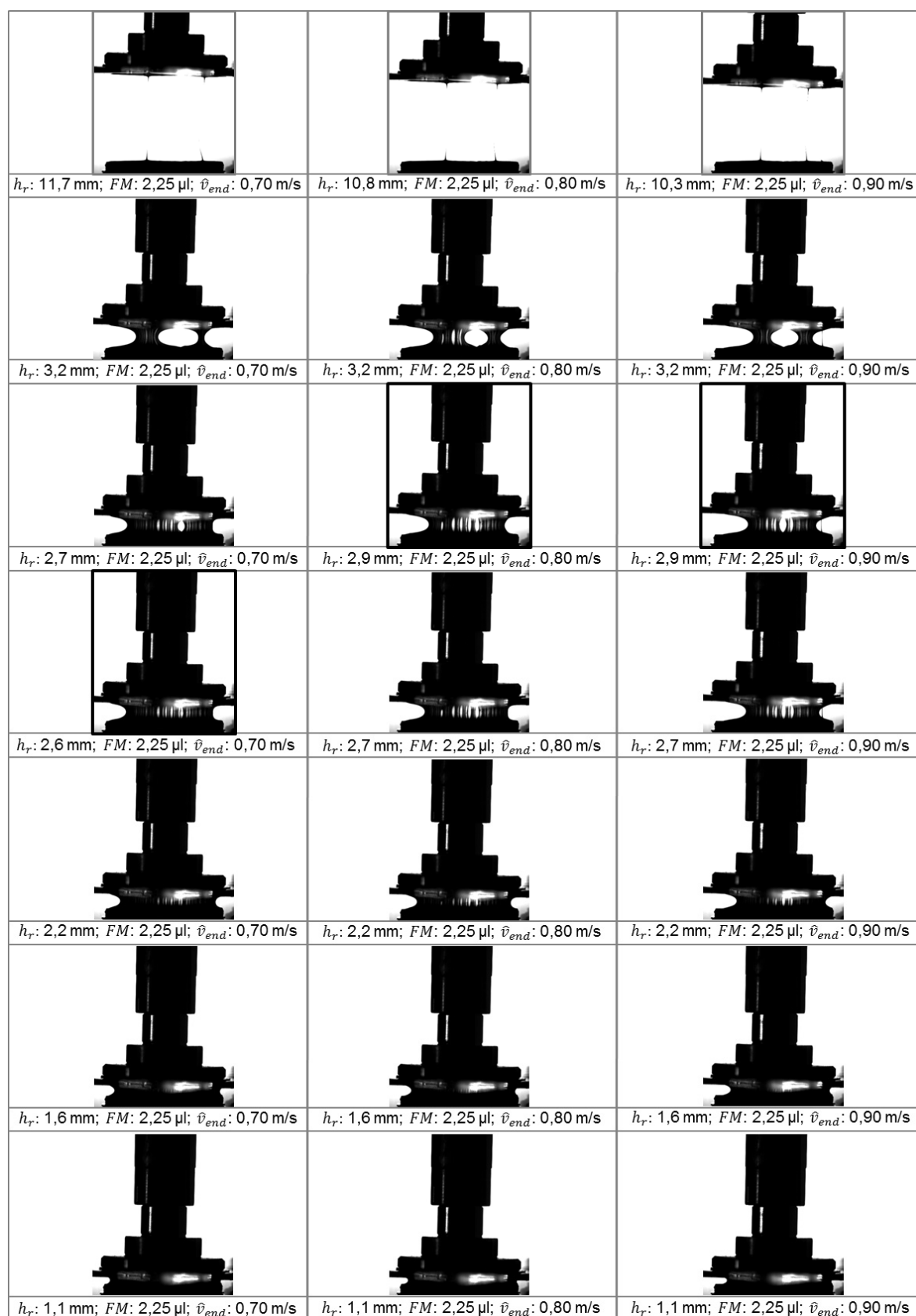


Abbildung V3_15: Videoausschnitte der Farbspaltung bei Endgeschwindigkeit $\hat{v}_{end} = 0,70$; $0,80$ und $0,90$ m/s, der Plattenseparation, dem relativen Plattenabstand h_r und der Fluidmenge FM von $2,25 \mu\text{l}$. Die Druckform hat eine Ausrichtung von $52,5^\circ$ bei einer Rasterweite von 60 Linien/cm bei einem Soll-Tonwert von 50% (tats. Tonwert 45,85%). Die verwendete Flüssigkeit ist die Druckfarbe Magenta 39-6.